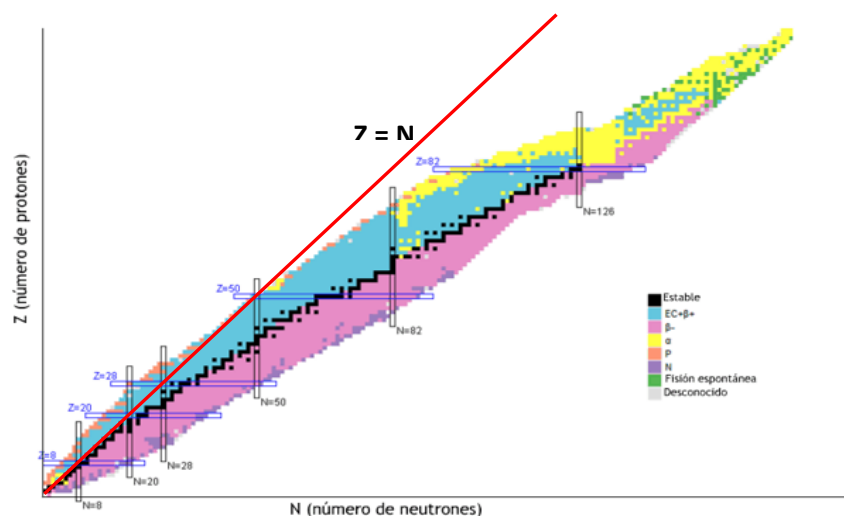


# T.10. FÍSICA NUCLEAR



1. El núcleo atómico	3
Conceptos básicos en física nuclear	3
2. Interacción nuclear fuerte	5
3. Radiactividad natural: Estabilidad del núcleo	6
4. Defecto de masa: energía de enlace	8
5. Radiactividad natural	11
5.1 Leyes del desplazamiento radiactivo	13
6. Ley de desintegración radiactiva	15
7. Método de datación del carbono-14	18
8. Reacciones nucleares. Radiactividad artificial	20
8.1 Fisión nuclear	21
8.2 Fusión nuclear	22
CUESTIONES	24
Cuestiones teóricas	24
Defecto de masa y estabilidad nuclear	24
Leyes de desplazamiento radiactivo	25
Ley de desintegración radiactiva	26
Carbono-14	26
Fusión y fisión nuclear	27
PROBLEMAS	28
Defecto de masa y estabilidad nuclear	28

---

Leyes de desplazamiento radiactivo	28
Ley de desintegración radiactiva	29
Carbono-14	32
Fusión y fisión nuclear	32

# 1. El núcleo atómico

Con el descubrimiento de la radiactividad a finales del siglo XIX nace la física nuclear. Este hecho sugirió la idea de que los átomos no eran esferas indivisibles (como proponía Dalton), si no que tenían que estar constituidos por **partículas elementales**. Con la experiencia de Rutherford en 1911, se puso de manifiesto por primera vez la composición del átomo en dos zonas bien diferenciadas:

**El núcleo atómico:** de un tamaño muy reducido (de unos  $10^{-14}$  m, es decir, unas  $10^5$  veces más pequeño que el átomo), con carga eléctrica positiva y con casi toda la masa del átomo.

**La corteza:** donde se encuentran los electrones en órbitas. La corteza tendrá por tanto carga eléctrica negativa y una masa despreciable con respecto al átomo.

Las partículas que forman parte del núcleo son el protón y el neutrón, que junto con el electrón (situado en la corteza del átomo) forman las llamadas **partículas elementales**, y cuyas características se expresan a continuación:

PARTÍCULA	CARGA ELECTRICA (e)	CARGA ELECTRICA (C)	MASA (kg)	MASA (u)
Protón (p)	+ 1	+ 1,6021 $10^{-19}$	1,6726 $10^{-27}$	1,0073
Neutrón (n)	0	0	1,6749 $10^{-27}$	1,0087
Electrón (e)	- 1	- 1,6021 $10^{-19}$	9,1096 $10^{-31}$	5,486 $10^{-4}$

En la actualidad se ha demostrado que tanto protones como neutrones están formados por otras partículas más pequeñas denominadas quarks.

## Conceptos básicos en física nuclear

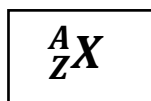
**-Nucleones:** partículas que se encuentran dentro del núcleo, por tanto pueden ser protones o neutrones.

**-Número másico (A):** número de nucleones que tiene un núcleo (suma de protones y neutrones).

**-Número atómico (Z):** número de protones del núcleo. En los átomos neutros es igual al número de electrones que existen en la corteza. Todos los átomos de un mismo elemento químico tienen el mismo número de protones, es decir, el número atómico es lo que caracteriza a los **elementos químicos**. El número de neutrones vendrá determinado por  $A-Z$ .

**-Núclido o nucleido:** conjunto de núcleos iguales entre sí, es decir, con igual número de protones (Z) y número másico (A). Se simbolizan por  ${}^A_ZX$ .

**-Isótopos:** Átomos con igual número atómico (Z) pero diferente número másico (A). Por lo tanto, son núcleos de un mismo elemento que se diferencian en el número de neutrones. Todos los isótopos tienen las mismas propiedades químicas, solamente se diferencian en que unos son un poco más pesados que otros. Muchos isótopos pueden desintegrarse espontáneamente emitiendo energía. Son los llamados **isótopos radioactivos**. Para referirnos a los isótopos tenemos la siguiente nomenclatura:



A continuación se muestran ejemplos para distintos tipos de átomos:

$^4\text{He}$ : Helio- 4

$^{14}\text{C}$ : Carbono- 14

$^{235}\text{U}$ : Uranio- 235

**-Isóbaros:** son átomos de distintos elementos que tienen el mismo número másico (A).

## Unidades en física nuclear

Las magnitudes que se utilizan en física nuclear son de un orden de magnitud muy diferente a las utilizadas en el S.I., por lo que se suele utilizar otras unidades que veremos a continuación.

**-Masa.** Para la masa se utiliza la **unidad de masa atómica (uma o u)** que se define como "la doceava parte de la masa de un átomo de carbono-12". La relación entre uma y kg es:

$$1\text{ u} = 1,6605 \times 10^{-27}\text{ kg}$$

**-Energía.** Para cuantificar la energía se utiliza el **electrón-voltio (eV)**, que se define como la energía que adquiere un electrón al aplicarle una diferencia de potencial de un voltio. Más frecuente es utilizar un múltiplo del eV, **el megaelectrón-voltio (MeV)**. La equivalencia del electrón-voltio con la unidad de energía en el sistema internacional (Julios) será:

$$1\text{ eV} = q_e V = 1,6 \times 10^{-19}\text{ C} \times 1\text{ V} = 1,6 \times 10^{-19}\text{ J}$$
$$1\text{ MeV} = 10^6\text{ eV}$$

### **-Relación Masa-Energía**

Con la teoría de la relatividad de Einstein se puso de manifiesto que la masa y la energía eran dos conceptos relacionados entre sí, es decir existe la posibilidad de transformar masa en energía y viceversa. Por tanto la masa también se puede expresar en forma de energía, haciendo uso de la relación de Einstein. Al aplicarla se obtiene la siguiente relación masa-energía.

$$E = \Delta m c^2 \Rightarrow 1\text{ u} = 931,48\text{ MeV}$$

Donde **m** es la cantidad de materia que se transforma en energía.

### **-Tamaño y densidad del núcleo**

La forma del núcleo se considera aproximadamente esférica y su tamaño depende del número de nucleones que tenga. Se puede aproximar que el radio del núcleo es:

$$r = R_0 \times A^{\frac{1}{3}}$$
$$R_0 = 1,2 \times 10^{-15}\text{ m}$$

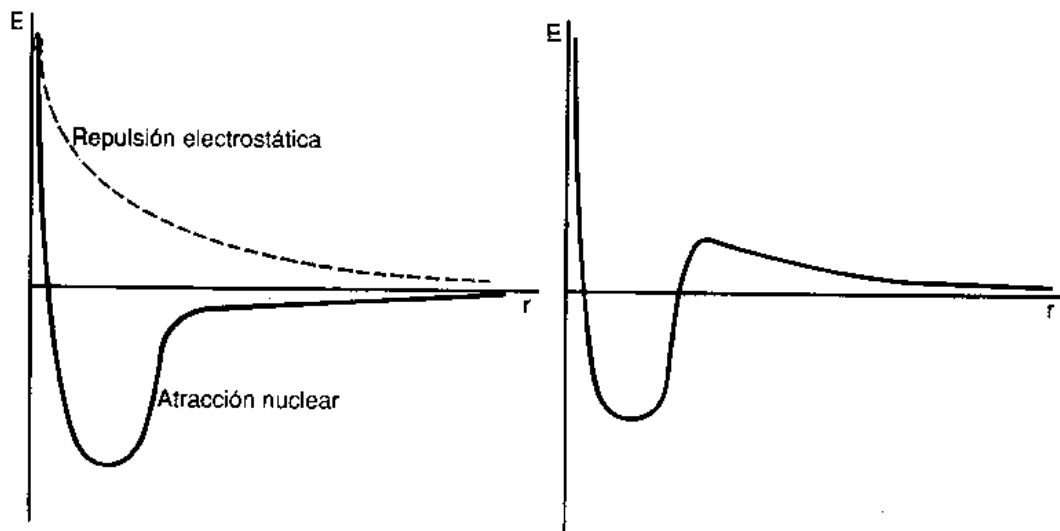
Como su tamaño es mucho más pequeño que el del átomo, y la masa es prácticamente la misma, resulta que el núcleo tendrá una densidad muy elevada. Por ejemplo, para un núcleo de número másico 100 se puede calcular que su densidad valdrá:

$$d = \frac{m}{V} = 2,3 \times 10^{17}\text{ kg/m}^3$$

## 2. Interacción nuclear fuerte

El tamaño típico del núcleo de un átomo es del orden de  $10^{-14}$  m. Esto es, **el tamaño del núcleo es del orden de una diezmilésima del total del átomo**. El conjunto de partículas nucleares, protones y neutrones, se localizan en un volumen muy reducido. Si consideramos que los protones tienen carga eléctrica positiva y que estas cargas deben de ejercer una considerable fuerza repulsiva entre ellas, **se ha de postular la existencia de una fuerza capaz de mantener los protones confinados en el núcleo**. Dicha fuerza debería cumplir algunos requisitos:

- Son específicamente nucleares, es decir, sólo afecta a los nucleones. (Actualmente se considera que actúa sobre los quarks que forman los nucleones.)
- Muy intensas**, unas 100 veces más intensas que la fuerza electrostática, por lo que pueden vencer la repulsión entre los protones y mantener el núcleo estable.
- Muy corto alcance**, sólo se ponen de manifiesto para distancia del orden de  $10^{-15}$  metros o menores. Para distancias mayores su valor es despreciable.
- Es una **fuerza atractiva** que a distancias más cortas se vuelve **repulsiva**. De esta forma se evita el colapso de los nucleones.
- Su valor es **independiente de la carga**. La atracción protón-protón, protón-neutrón y neutrón-neutrón son prácticamente iguales.
- Son **fuerzas saturadas**, es decir cada nucleón sólo puede atraer a un número determinado de nucleones. Esto hace que todos los núcleos tengan prácticamente la misma densidad.
- Es una **fuerza conservativa**, por lo tanto se puede definir unos valores de energía potencial asociada a la fuerza nuclear. Si representamos la energía potencial en función de la distancia al centro del núcleo obtendríamos las siguientes gráficas:



Como se puede ver en la gráfica anterior existe una distancia de equilibrio a la que la energía potencial es mínima. Esto determina la distancia media entre los nucleones. Cuando se acercan demasiado aparece una fuerza repulsiva que evita el colapso del núcleo.

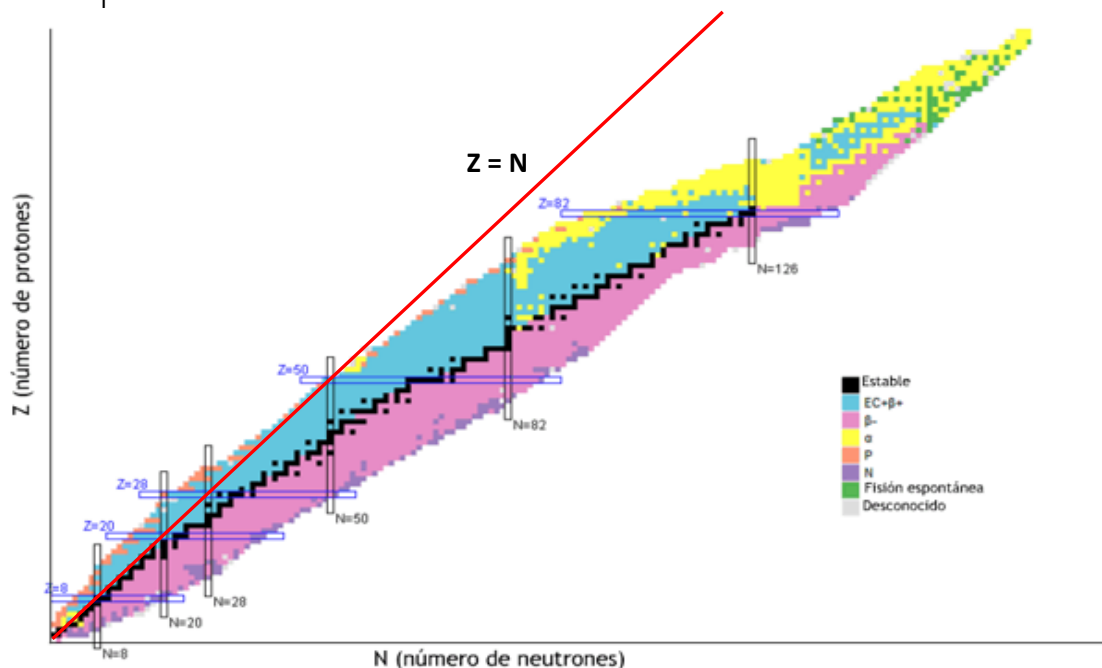
### 3. Radiactividad natural: Estabilidad del núcleo

Algunos elementos (la mayor parte de ellos con un número atómico superior a 83) se transforman espontáneamente en átomos de otros elementos con un número atómico próximo, a la vez que emiten partículas y energía. El descubrimiento de este fenómeno, realizado a principios de 1896 y conocido con el nombre de **radiactividad**, se atribuye a Henry Becquerel.

**La radiactividad es un fenómeno nuclear.** Es decir, los procesos que dan lugar a que los elementos se transmuten en otros emitiendo partículas y energía tiene lugar en el interior del núcleo atómico. Existen nucleidos estables (una minoría) y otros que son inestables (la gran mayoría). Por esta razón sólo los nucleidos más estables se encuentran en la naturaleza, ya que los inestables se desintegran en un intervalo de tiempo más o menos corto en los isótopos más estables.

**¿Qué es lo que determina que un nucleido sea más o menos estable? ¿Cuáles son los procesos nucleares mediante los que se produce la transmutación de los elementos?**

La estabilidad o inestabilidad de los mismos siguen unos requisitos que se pueden poner de manifiesto representando el número de neutrones (N) frente al de protones (Z) en los diferentes isótopos:



La línea recta con inclinación de  $45^\circ$  indica la posición de aquellos núcleos con igual número de protones que de neutrones. Como puede observarse:

1. Los elementos de número atómico bajo (núcleos ligeros) la relación  $N/Z$  tiende a la unidad.
2. A partir de  $Z = 20$ , el número de neutrones se hace mayor en los núcleos estables. El motivo de esta proporción es debido a que al aumentar  $Z$ , aumenta las fuerzas repulsivas entre protones, y para mantener la estabilidad en los núcleos pesados debe aumentar la proporción de neutrones para compensar la mayor repulsión protón – protón.

---

A partir de esta curva de estabilidad se puede prever cómo se estabilizarán los núcleos inestables en torno a los átomos estables.

## 4. Defecto de masa: energía de enlace

Se puede medir con exactitud la masa de un núcleo cualquiera, y al hacerlo se comprueba que la masa de ese núcleo es menor a la suma de las masas de los nucleones (protones más neutrones) que forman ese núcleo. Esa diferencia de masa es lo que se denomina **defecto de masa** del núcleo. Es la diferencia entre la masa de las partículas del núcleo separadas y la masa del núcleo, se puede determinar según la ecuación:

$$\Delta m = [Z m_p + (A - Z) m_n] - m_x$$

Donde  $m_p$  es la masa de un protón,  $m_n$  la masa del neutrón y  $m_x$  la masa del núcleo.

**Ejemplo:** Calcula el defecto de masa del átomo de helio ( ${}^4\text{He}$ ). Datos:  $m_p=1,0073$ ,  $m_n=1,0087$ ,  $m_{\text{He}}=4,0039$

*Calculamos el defecto de masa calculando la diferencia entre la masa de las partículas del núcleo separadas y juntas:*

$$m = [2 \times 1,0073\text{u} + 2 \times 1,0087\text{u}] - 4,0039\text{u} = 0,0281\text{u}$$

*Como observamos hay un defecto de masa positivo. Las masas de las partículas por separado son mayores que cuando están juntas.*

### Energía de enlace

Este defecto de masa se interpreta, según el principio de equivalencia entre masa y energía establecido por Einstein, como una energía liberada al formarse el átomo según la ecuación:

$$E = mc^2$$

Esta energía coincide con la energía que se desprende al enlazarse los nucleones y formarse el núcleo, por lo que se denomina **energía de enlace o energía de ligadura** del núcleo (o energía necesaria para romper el núcleo y disgregarlo en las partículas integrantes). Esta energía de enlace corresponde con la energía potencial asociada a la fuerza nuclear y que ha sido enunciada anteriormente.

### Energía de enlace por nucleón

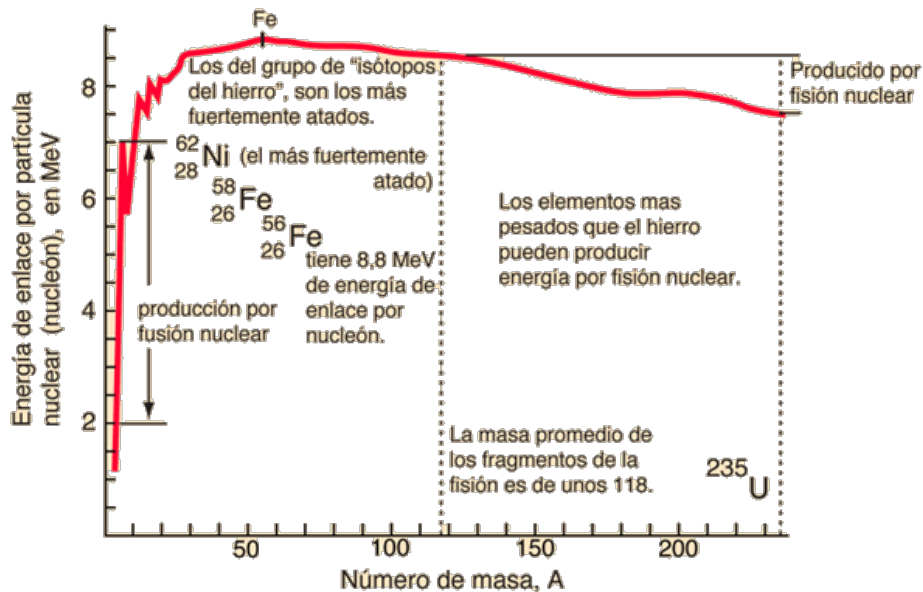
Una magnitud muy utilizada en física nuclear es la **energía de enlace por nucleón**, que sería el cociente entre la energía de enlace y el número de nucleones del núcleo.

$$E_n = \frac{E}{A}$$

Esta magnitud se utiliza para medir la estabilidad del núcleo, ya que, mientras mayor sea la energía por nucleón, mayor es la energía necesaria suministrar a cada nucleón para separarlo, es decir, mayor es la fuerza con la que serán atraídos los nucleones, y por tanto mucho más estable será ese núcleo en concreto.



Si representamos la energía de enlace por nucleón en función del número másico (A), se obtiene la siguiente gráfica:



En la gráfica se puede observar:

1. Los núcleos con mayor estabilidad son aquellos que tienen mayor energía por nucleón. Son aquellos a los que tenemos que comunicar más energía para separar los constituyentes del núcleo. Se puede ver que la gráfica tiene un máximo en torno a  $A=56$  ( $^{56}\text{Fe}$ ). A partir del hierro la energía de enlace por nucleón empieza a disminuir y los átomos son cada vez menos estables.
2. La gráfica de estabilidad tiene especial relevancia a la hora de explicar los distintos tipos de reacciones nucleares que pueden tener lugar. Las reacciones de *fusión* se producen para átomos que se encuentran antes del máximo de estabilidad mientras que las de *fisión* se producen para átomos después del máximo de estabilidad.

En la parte izquierda de la gráfica vemos que podemos obtener los núcleos de los elementos a partir de los precedentes (tal y como ocurrió al principio de universo mediante reacciones de **fusión**) obtenemos núcleos cada vez más estables respecto a los precedentes, lo cual es un proceso energéticamente favorable. El hierro marcaría el punto en el cual la **nucleosíntesis** (creación de núcleos de elementos más pesados a partir de núcleos más ligeros) dejaría de ser un proceso energéticamente favorable para pasar a absorber energía. A partir de ahí el proceso favorable es el inverso: la **fisión** nuclear. Hoy día se considera que los elementos más pesados que el hierro se han formado gracias a la energía desprendida en las explosiones de supernovas (recordar que la formación de estos núcleos es un proceso endotérmico).

**Ejemplo:** El hierro 56 tiene un número atómico  $Z = 26$  y una masa de  $55,9394 \text{ u}$ . Sabiendo que la masa de un protón es  $1,0073 \text{ u}$  y la de un neutrón es  $1,0087 \text{ u}$ , determine:

- a) El defecto de masa en u.
- b) La energía de enlace del núcleo en julios
- c) La energía de enlace por nucleón en julios

DATOS:  $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ;  $1\text{u}=1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}$

---

a) Calculamos el defecto en masa viendo la diferencia entre la masa del núcleo y la de los nucleones que lo forman:

$$\Delta m = [Z m_p + (A - Z) m_n] - M_{\text{núcleo}}$$

$$\Delta m = [26 \cdot 1,0073 \text{ u} + 30 \cdot 1,0087 \text{ u}] - 55,9394 \text{ u} = 0,5114 \text{ u}$$

b) La energía correspondiente al defecto de masa es la energía de enlace:

$$E_{\text{Enlace}} = \Delta m c^2 = 0,5114 \text{ u} \cdot \frac{1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{1 \text{ u}} \left( 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = 7,64 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

c) La energía de enlace por nucleón será:

$$\frac{E_{\text{Enlace}}}{\text{nucleón}} = \frac{E_{\text{Enlace}}}{A} = \frac{7,64 \cdot 10^{-11} \text{ J}}{56} = 1,36 \cdot 10^{-12} \frac{\text{J}}{\text{nucleón}}$$

## 5. Radiactividad natural

Emisión espontánea de radiaciones por parte un núcleo inestable. Estas radiaciones tienen su origen en el núcleo, y no deben confundirse con las emisiones debido a la capa electrónica (rayos X, efecto fotoeléctrico, etc.). En los fenómenos de radiactividad los núcleos radiactivos se desintegran transformándose en un núcleo de un elemento distinto.

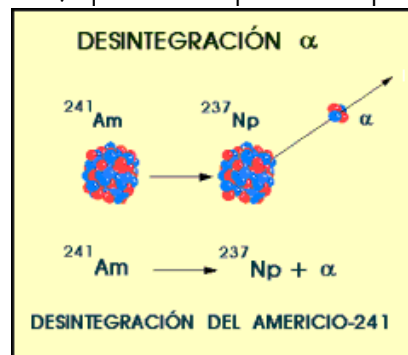
### Descubrimiento

El descubrimiento de la radiactividad se debe a **Becquerel**, quien en 1896 observó como unas sales de uranio eran capaces de impresionar placas fotográficas. Fueron el matrimonio **Curie** quienes determinaron que la radiación era debida al propio átomo de uranio. Posteriormente demostraron que el torio también es radiactivo, y además descubrieron dos nuevos elementos, el polonio y el radio, los cuales resultaron radiactivos.

Rutherford, para estudiar la naturaleza de las radiaciones emitidas por los átomos, estudió el comportamiento de estas radiaciones en el interior de campos magnéticos y campos eléctricos, y obtuvo que existían tres comportamientos distintos, y por tanto eran tres tipos de emisiones radiactivas. Estas radiaciones también se pueden diferenciar por el distinto grado de penetración en la materia.

### Radiación alfa ( $\alpha$ )

Formada por núcleos de helio ( ${}^4\text{He}^{2+}$ ) que son expulsados por un núcleo atómico.

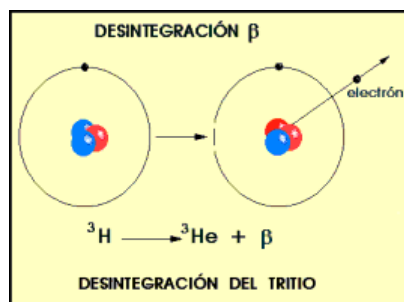


#### Características:

- Radiación poco penetrante, ya que son absorbidos o detenidos incluso por una hoja de papel y apenas penetran la piel.
- En presencia de un campo eléctrico la radiación alfa se desvía a favor del campo. Al ser núcleos de helio tienen carga positiva.
- Es frecuente en los núcleos inestables muy pesados. Cuando un núcleo emite una partícula alfa, el núcleo original se desintegra y transmuta convirtiéndose en otro elemento distinto:

## Radiación beta ( $\beta$ )

Formada por electrones muy energéticos. Esto es debido a que se desplazan a velocidades cercanas a las de la luz.



### Características:

- Radiación bastante penetrante, necesitan una lámina de aluminio de 0,5 cm para ser absorbidos, y penetran hasta 1,5 cm en la piel.
- Son desviados fuertemente en sentido contrario al campo eléctrico ya que tienen carga negativa.
- Esta radiación es típica en los núcleos inestables con abundantes neutrones. Cuando un núcleo emite una partícula beta, se transforma en un núcleo de otro elemento distinto:

El electrón que se emite en la radiación beta también proviene del núcleo (no es un electrón de la corteza). Este electrón proviene de la desintegración de un neutrón del núcleo, que se transforma en un protón, un electrón y un antineutrino, según el esquema siguiente:

El electrón que se forma es el que sale del núcleo a una gran velocidad, mientras que el protón se queda en el núcleo. Para que ocurra la desintegración del neutrón y se emita una partícula beta, es necesario postular que intervenga una fuerza capaz de producir esa desintegración. Esta es la **fuerza nuclear débil**, fuerza de muy corto alcance, sólo actúa a distancias menores de  $10^{-15}$  m, y de menor intensidad que la fuerza nuclear fuerte. De la fuerza nuclear débil aún se dispone de muy pocos datos para su conocimiento.

## Radiación beta ( $\gamma$ )

Está formada por radiación electromagnética de alta energía.

### Características:

- Radiación muy penetrante que no es desviada por los campos eléctricos ni los magnéticos, es decir, no tiene cargas eléctricas. Esta formada por radiación electromagnética.
- Suele ocurrir después de un proceso nuclear (emisiones alfa, beta o cualquier otro proceso).
- Después de un proceso nuclear, el núcleo formado suele estar "excitado", es decir, tiene más energía de lo normal, por lo que el núcleo, para bajar su nivel energético emite la energía sobrante en forma de radiación electromagnética, alcanzando su estado fundamental. Cuando se produce una emisión gamma el núcleo no cambia por tanto sus características, sólo disminuye su energía.

---

## Leyes de conservación

En las desintegraciones radiactivas se deben cumplir las distintas leyes de conservación como son: conservación de la energía, conservación del momento lineal, conservación del momento angular, conservación de la carga eléctrica y conservación del número de nucleones.

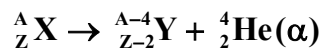
En este momento vamos a destacar el principio de conservación de la energía, recordando que según el nuevo concepto de Einstein la masa se considera como una forma de energía. Es conveniente tener presente este principio de conservación ya que en los procesos nucleares suelen desprenderse una gran cantidad de energía, tanto en forma de radiación electromagnética como en forma de energía cinética de las partículas. Esta energía procede de las variaciones que se producen en las masas durante el transcurso de la reacción.

### 5.1 Leyes del desplazamiento radiactivo

Dictan los cambios de los núcleos en los procesos radiactivos. Cuando un núclido sufre una desintegración radiactiva sufre una transformación. Fue **Soddy y Fajans** quien en 1913, cuando aún no se conocía la estructura del núcleo, descubrió las transformaciones que se realizaban en el núcleo. Estas transformaciones se resumen en las llamadas leyes de desplazamiento químico o leyes de Soddy-Fajans:

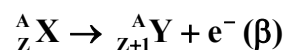
- **Radiación Alfa**

Cuando un núclido emite una partícula alfa, su número másico decrece en cuatro unidades y el número atómico en dos unidades.



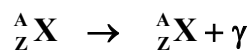
- **Radiación Beta**

Cuando un núclido emite una partícula beta, su número másico no cambia, y su número atómico se incrementa en una unidad.



- **Radiación Gamma**

Cuando un átomo emite una radiación gamma, se altera su contenido energético, pero no se modifica el número másico ni el número atómico.



Se puede comprobar con facilidad que se cumplen las siguientes leyes de conservación:

- Conservación de la carga total: La carga eléctrica total del sistema permanece constante.
- Conservación del número de nucleones: El número total de nucleones permanece constante.

**Ejemplo:** Entre los materiales gaseosos que se pueden escapar de un reactor nuclear se encuentra el que es muy peligroso por la facilidad con la que se fija en la glándula tiroides.

a) Escribe la reacción de desintegración sabiendo que se trata de un emisor beta y se transforma en Xenon.

b) Calcula, en unidades S.I., la energía total liberada por el núclido al desintegrarse.

---

DATOS:  $^{131}\text{I}=130,90612 \text{ u}$ ;  $^{131}\text{Xe}=130,90508 \text{ u}$ ; partícula beta:  $5,4891 \cdot 10^{-4} \text{ u}$ ;  $1 \text{ uma} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ;  $c=3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

a) La emisión beta implica la conversión de un neutrón en un protón. El núclido resultante, por tanto, tendrá un número atómico una unidad superior (correspondiente al Xe) y su número másico será idéntico:

b) Calculamos el defecto de masa:

La energía generada (masa convertida en energía) será:

$$E = \Delta m c^2 = 7,3 \times 10^{-14} \text{ J}$$

## 6. Ley de desintegración radiactiva

Tal y como se ha discutido en el apartado anterior existen núclidos inestables que tratan de adquirir una mayor estabilidad emitiendo radiactividad: partículas y energía. Como consecuencia de este proceso los núclidos radiactivos van desapareciendo transformándose en otros más estables, proceso que recibe el nombre de "**decaimiento radiactivo**".

Las desintegraciones radiactivas son **procesos aleatorios** (ocurren al azar) y son regidos por las leyes estadísticas. Normalmente están involucrados un número elevado de átomos. Por este motivo, para estudiar los procesos de decaimiento radiactivo se hace un estudio estadístico.

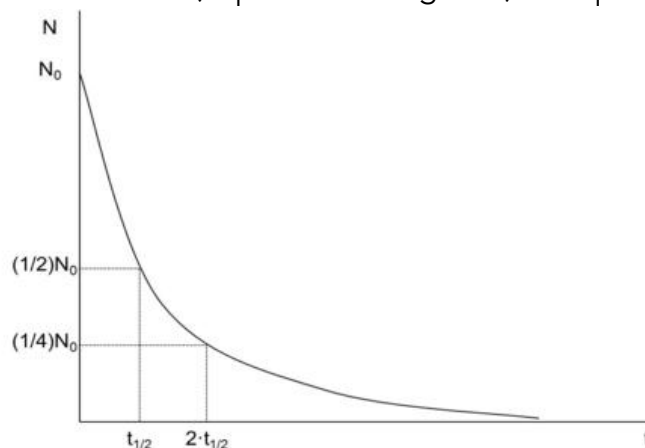
Si llamamos  $N_0$  al número de núclidos inicialmente presentes, al cabo de un tiempo  $t$  estarán presentes una cantidad,  $N$ , dada por la expresión:

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

Donde  $\lambda$  es la **constante de desintegración**. Es característica de cada núclido y representa la probabilidad de que un núcleo se desintegre por unidad de tiempo.

Es importante notar que **es imposible predecir cuando se va a desintegrar un núcleo determinado**. No obstante, sí podemos saber cuántos van a desintegrarse (o quedar) al cabo de un cierto tiempo usando la ecuación anterior.

Si representamos la ecuación anterior (exponencial negativa) nos queda la siguiente gráfica:



Vemos como el número de núclidos presentes va disminuyendo a medida que pasa el tiempo.

### Magnitudes características

#### Periodo de semidesintegración o semivida ( $t_{1/2}$ o $T$ )

Es el tiempo necesario para que se desintegre la mitad de los núcleos iniciales de la muestra ( $N_0$ ).

Podemos deducir una expresión para el periodo de semidesintegración utilizando la ley de desintegración radiactiva:

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

Cuando ha transcurrido el periodo de semidesintegración se cumple:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \rightarrow t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Utilizaremos T o  $t_{1/2}$  para designar al periodo de semidesintegración:

$$T = t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

## Vida media ( $\tau$ )

Se denomina vida media al tiempo medio que tarda un núcleo en desintegrarse.

La vida media es un concepto puramente estadístico y viene dada por la inversa de la constante de desintegración:

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

## Actividad o velocidad de desintegración (A)

A la velocidad de desintegración de una sustancia radiactiva se denomina actividad (A) y se puede calcular derivando la expresión de la ley del decaimiento radiactivo respecto del tiempo:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N$$

Gráficamente se puede identificar esta cantidad con la pendiente de la gráfica anterior. Como se puede la pendiente va cambiando con el tiempo. Por lo tanto, la actividad es una cantidad que depende del tiempo.

La unidad S.I. es núcleos/s (ó  $s^{-1}$ ) que se conoce con el nombre de becquerel (Bq) o becquerelio. Se define como la actividad de una cantidad de material radioactivo con una tasa de decaimiento de un núcleo por segundo.

**Ejemplo:** El  $^{22}\text{Na}$  es un nucleído radiactivo con un periodo de semidesintegración de 2,60 años.

- ¿Cuánto vale su constante de desintegración?
- En el instante ( $t=0$ ) en que una muestra tiene  $4,3 \cdot 10^{16}$  núcleos de  $^{22}\text{Na}$  ¿cuál es su actividad en becquerelios (desintegraciones por segundo)?
- Cual será su actividad para  $t = 1$  año?
- ¿Cuánto valdrá su constante de desintegración para  $t = 1$  año?
- ¿Cuándo será nula su actividad?

a) *La emisión beta La constante de desintegración y periodo de semidesintegración son inversamente proporcionales:*

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = 0,2666 \text{ años}^{-1}$$

b) *La actividad de una muestra es indicativa de la velocidad de desintegración:*



---

$$A = N\lambda = 1,146 \times 10^{16} \text{ años}^{-1} = 3,63 \times 10^8 \text{ Bq}$$

c) La actividad depende del número de núcleos presentes. Al cabo de un año quedarán:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = 3,3 \times 10^{16} \text{ núcleos}$$

Su actividad, por tanto, vendrá dada por:

$$A = N\lambda = 8,78 \times 10^{15} \text{ años}^{-1} = 2,78 \times 10^8 \text{ Bq}$$

d) La constante de desintegración, tal y como su nombre indica, no varía con el tiempo. Es una constante característica del núclido y que en este caso vale  $0,2666 \text{ año}^{-1}$

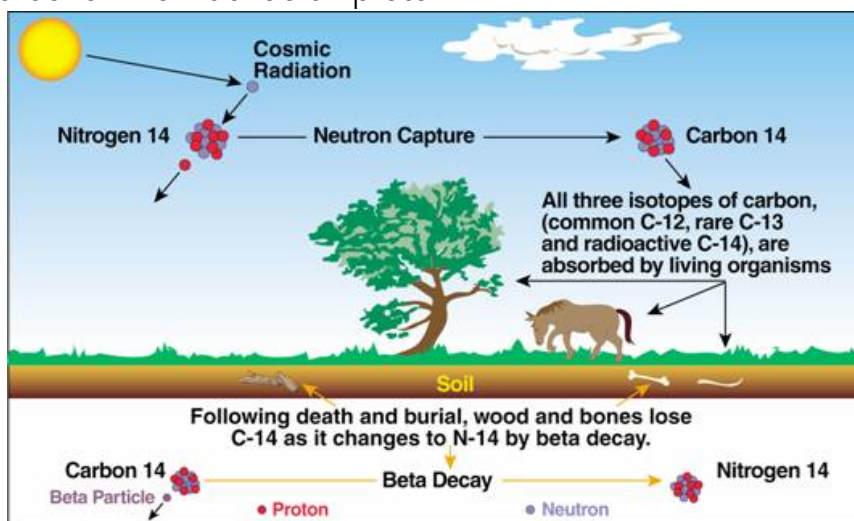
e) Como  $A = N\lambda$ , la actividad será nula cuando  $N$  (número de núcleos presentes) sea cero. Según la ley de decaimiento radiactivo el número de núcleos sin desintegrar decrece de forma exponencial, lo que implica que será nula para un tiempo infinito, aunque en un tiempo finito (más o menos largo) su actividad será prácticamente nula.

## 7. Método de datación del carbono-14

El carbono tiene tres isótopos que se encuentran en las siguientes proporciones:

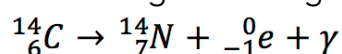
$$C \begin{cases} {}^{12}_6C \rightarrow 98,9 \% \\ {}^{13}_6C \rightarrow 1,1 \% \\ {}^{14}_6C \rightarrow \text{trazas} \end{cases}$$

El  ${}^{14}C$  es el menos abundante, es un isótopo radiactivo que se forma en las capas altas de la atmósfera debido a la acción de los rayos cósmicos. La radiación cósmica produce neutrones que al chocar con los átomos de nitrógeno atmosférico hacen estos sean inestables y se transformen en carbono 14 emitiendo un protón.

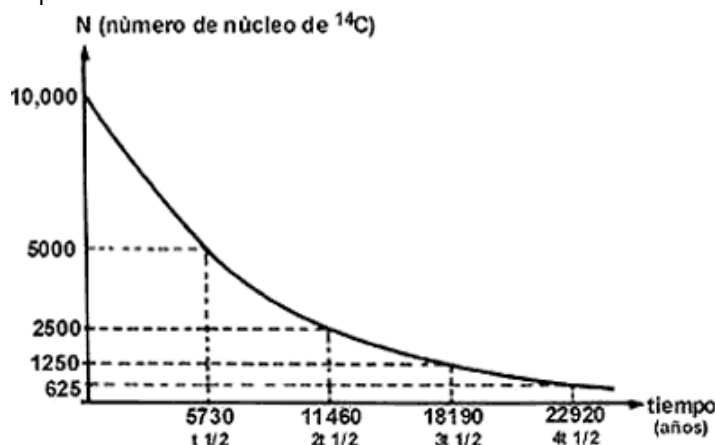


Las plantas asimilan el  $CO_2$  atmosférico y parte de ese  ${}^{14}C$  es asimilado y almacenado por los seres vivos. Mientras un organismo está vivo ingiere con los alimentos el isótopo  ${}^{12}C$ , no radiactivo, junto con el  ${}^{14}C$ , radiactivo. Este último isótopo se desintegra, pero como al alimentarnos lo reponemos constantemente, la cantidad de  ${}^{14}C$  permanece constante en el organismo. Al morir y dejar de ingerir alimentos la cantidad de  ${}^{14}C$  disminuye exponencialmente con el tiempo según la ley de decaimiento radiactivo. Es como si se pusiera en marcha un reloj.

El  ${}^{14}C$  es un isótopo radiactivo que se desintegra de la siguiente forma:



Tiene un periodo de desintegración es de 5 730 años. Si suponemos que tenemos inicialmente 10.000 átomos del isótopo esta sería la curva de decaimiento:



---

Al cabo de 5 730 años el número de átomos presentes será la mitad de los originales (50%), al cabo de  $5730 \times 2 = 11\,640$  años solamente quedarán el 25 % y así sucesivamente.

Determinando la proporción de  $^{14}\text{C}$  en la muestra se puede determinar su antigüedad. Esta técnica permite determinar la antigüedad de muestras hasta unos 50 000 años. El problema radica en que es complicado medir dicha proporción ya que el  $^{14}\text{C}$  es un isótopo muy poco abundante.

**Ejemplo:** Entre unos restos arqueológicos de edad desconocida se encuentra una muestra de carbono en la que solo queda una octava parte del carbono-14 que contenía originalmente. El periodo de semidesintegración del carbono-14 es de 5730 años.

a) Calcule la edad de dichos restos.

b) Si en la actualidad hay  $10^{12}$  átomos de carbono-14 en la muestra, ¿cuál es su actividad?

a) Aplicamos la ley de desintegración radiactiva y sustituimos los datos del enunciado:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \rightarrow \frac{1}{8} = e^{-\left(\frac{\ln 2}{t_{1/2}}\right)t}$$

Aplicando logaritmos neperianos obtenemos:

$$\ln \frac{1}{8} = -\left(\frac{\ln 2}{t_{1/2}}\right)t \rightarrow -\ln 8 = -\left(\frac{\ln 2}{t_{1/2}}\right)t \rightarrow t = \frac{\ln 8}{\ln 2} \times 5730 \text{ años} = 17190 \text{ años}$$

b) La actividad de una muestra radiactiva viene dada por la siguiente expresión:

$$A = \lambda N$$

Pasamos a segundos el periodo de semidesintegración:  $t_{1/2} = 1,8 \times 10^{11} \text{ s}$

Calculamos la constante radiactiva:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = 3,85 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$$

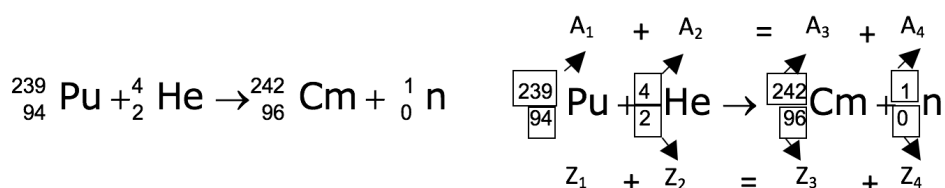
Por último calculamos la actividad:

$$A = \lambda N = 3,85 \text{ desintegraciones/s}$$

## 8. Reacciones nucleares. Radiactividad artificial

Hemos visto que los fenómenos de radiactividad natural consisten en la transformación natural y espontánea del núcleo. Se pueden inducir estas transformaciones de modo artificial. A este tipo de transformaciones se les conoce con el nombre de reacciones nucleares. Las reacciones nucleares se producen cuando dos núcleos se sitúan muy próximos (para lo cual deberán vencer la repulsión coulombiana que tiende a separarlos) produciéndose un reagrupamiento de los nucleones por acción de la fuerza nuclear fuerte.

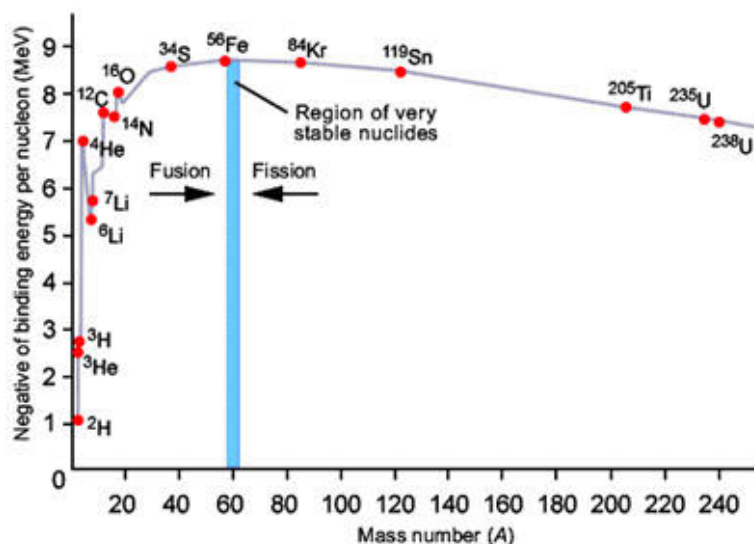
Las reacciones nucleares pueden ser consideradas como colisiones entre dos cuerpos en las que se conserva: la energía, el momento lineal, además del **número de nucleones** y la carga eléctrica. En las reacciones nucleares se produce un **reagrupamiento** de los nucleones por lo que se conserva tanto la suma de los números másicos como la de los atómicos de los núclidos participantes:



Los números atómicos y másicos asignados al protón, neutrón, electrón y positrón se resumen en la tabla siguiente:

Partícula	A	Z	Notación
Protón	1	1	${}_1^1\text{H}$
Neutrón	1	0	${}_0^1\text{n}$
Electrón	0	-1	${}_{-1}^0\text{e}^-$
Positrón	0	1	${}_1^0\text{e}^+$

Vamos a estudiar las reacciones nucleares de fisión y fusión. Como vimos, la gráfica de estabilidad determina que las reacciones de fusión se producen para átomos que se encuentran antes del máximo de estabilidad mientras que las de fisión se producen para átomos después del máximo de estabilidad:

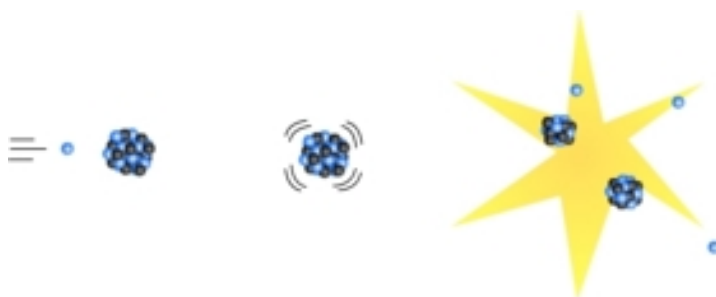
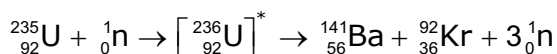


En los elementos con pocos nucleones las reacciones de **fusión** son energéticamente favorables ya que los elementos con mayor número másico son más estables. El hierro marca el punto de máxima estabilidad. A partir de ahí, el proceso favorable es el inverso: la **fisión** nuclear

## 8.1 Fisión nuclear

Consiste en fragmentar un núcleo muy pesado en otros más ligeros bombardeándolos con neutrones. Se utilizan neutrones, porque al no existir la repulsión electrostática, necesitan menos energía cinética para alcanzar los núcleos. El núcleo diana captura entonces el neutrón y se forma un núclido excitado y altamente inestable que se rompe en dos fragmentos.

Una reacción típica de fisión es la experimentada por el núcleo de  $^{235}\text{U}$  al ser bombardeado con neutrones lentos (o térmicos):



### Rendimiento energético

La importancia de este proceso es la gran cantidad de energía que se libera. Se puede llegar a liberar unos 200 MeV por cada núcleo fisionado (1 gramo de uranio produce la misma energía que  $2 \cdot 10^6$  g de petróleo). La reacción y el desprendimiento de energía se pueden comprender observando en la gráfica de energía por nucleón como los núcleos formados son mucho más estables (una mayor energía por nucleón) que el núcleo inicial. La diferencia de energía entre el núcleo inicial y los núcleos finales es la que se desprende en el proceso.

En la reacción nuclear se cumple que la suma de las masas de los productos es menor que la de los reactivos:

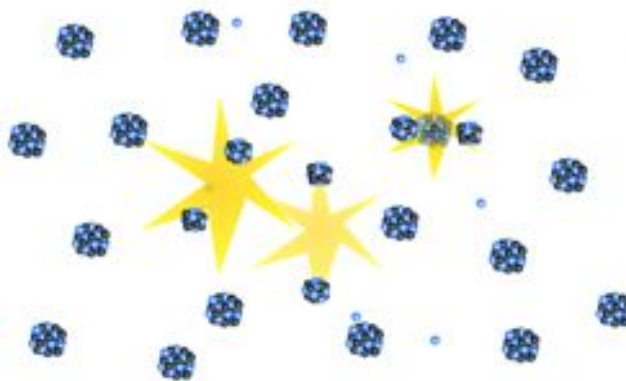
$$M(^{235}_{92}\text{U}) + M({}^1_0\text{n}) > M(^{141}_{56}\text{Ba}) + M(^{92}_{36}\text{Kr}) + 3M({}^1_0\text{n})$$

Este defecto de masa se convierte en energía ( $E = mc^2$ ).

### Reacción en cadena

Lo interesante de la fisión del  $^{235}\text{U}$  es que en la reacción se producen una media de 2,5 neutrones, los cuales pueden provocar nuevas fisiones, dando lugar a una reacción en cadena que puede controlarse introduciendo barras de algún material que sea capaz de absorber neutrones (cadmio por ejemplo), de tal forma que la reacción se automantenga, pero sin llegar a ser explosiva.

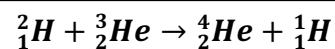
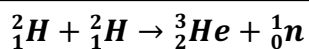
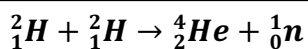
Si la reacción no se controla se produce una reacción en cadena que libera una cantidad enorme de energía. Este es el principio en el que se basan las bombas atómicas.



Con el propósito de controlar las reacciones nucleares en los reactores nucleares se instalan moderadores que capturan y disminuyen la velocidad de los neutrones (barras de grafito)

## 8.2 Fusión nuclear

Consiste en la obtención de un núcleo más pesado a partir de dos núcleos más ligeros. Para ello es necesario aproximar lo suficiente ambos núcleos para que pueda actuar la fuerza nuclear. Como mientras mayor sean los núcleos, (mayor Z) más difícil es aproximarlos, La fusión nuclear sólo es posible con núcleos muy ligeros, donde la repulsión electrostática es menor. Por ejemplo con los isótopos del hidrógeno (protio, deuterio y tritio) y el helio:



En la naturaleza, este proceso tiene lugar en todas las estrellas, donde continuamente se están fusionando protones para formar, después de varios procesos, núcleos de helio. El helio formado luego puede seguir fusionándose para formar elementos más pesados. En todos estos procesos de fusión se desprende una enorme cantidad de energía manteniendo a las estrellas a unas temperaturas altísimas.

## Ventajas

El proceso de fusión presenta importantes ventajas con respecto a la fisión para la obtención de energía:

- Presenta un mayor rendimiento energético. En reacciones de fisión se obtiene 1 MeV/nucleón, mientras que en reacciones de fusión se llega a producir unos 3 MeV/nucleón (ver gráfica de energía de enlace por nucleón).
- Es una fuente de energía mucho más limpia. No produce desechos radiactivos, mientras que en las reacciones de fisión el principal problema es que hacer con los desechos radiactivos que se producen.
- Los reactivos que se utilizan son muy abundantes en la naturaleza. El deuterio y tritio ( ${}^2\text{H}$  y  ${}^3\text{H}$ ) son muy fáciles de encontrar, mientras que el uranio-235 es muy escaso.

## Inconvenientes

A pesar de todas estas ventajas todavía no se han podido construir centrales nucleares de fusión debido a las enormes temperaturas del orden de millones de grados que se pueden alcanzar en este proceso. A esta temperatura la materia se encuentra en forma de plasma. Los reactores de fusión que existen en la actualidad confinan el plasma utilizando campos

---

magnéticos (confinamiento magnético). El problema es que no consiguen reacciones nucleares de manera estable y hay que suministrarles más energía de la que devuelven para producir las reacciones.

**Ejemplo:** Para controlar la fusión nuclear se está construyendo en Cadarache (Francia) el ITER (Reactor Internacional de Fusión Termonuclear). Se pretende fusionar deuterio , y tritio, , para dar lugar a helio .

a) Escriba la reacción nuclear.

b) Determine la energía liberada en la formación de 0,1 g de .

Datos:  $c=3 \times 10^8$  m/s;  $m({}_1^2H)=2,01474$  u;  $m({}_1^3H)=3,01700$  u;  $m({}_2^4He)=4,00388$  u;  $m({}_0^1n)=1,0087$  u;  $1u=1,67 \times 10^{-27}$  kg

a) La reacción nuclear de fusión es:

b) Calculamos el defecto de masa para la formación de un átomo de helio:

Pasamos el defecto de masa al sistema internacional:

$$\Delta m = 3,2 \times 10^{-29} \text{ kg}$$

Calculamos la energía liberada en la formación de un átomo de helio:

$$E = \Delta m c^2 = 2,88 \times 10^{-12} \text{ J}$$

Calculamos el número de átomos de helio que hay en 0,1 g:

$$0,1 \text{ g He} \times \left( \frac{1 \text{ mol}}{4 \text{ g}} \right) \times \left( \frac{6,022 \times 10^{23} \text{ átomos}}{1 \text{ mol}} \right) = 1,5 \times 10^{22} \text{ átomos}$$

Calculamos la energía liberada por 0,1 g de helio:

$$E = 2,88 \times 10^{-12} \frac{\text{J}}{\text{átomo}} \times 1,5 \times 10^{22} \text{ átomos} = 4,32 \times 10^{10} \text{ J}$$

---

# CUESTIONES

## Cuestiones teóricas

- ¿Qué ventajas presenta la fusión nuclear frente a la fisión? Indica al menos tres de ellas.
  - Describe, define o enuncia, de forma concisa y clara, los siguientes fenómenos físicos: radiactividad natural, radiactividad artificial, fisión y fusión.
  - Di si es cierto o falso y razona la respuesta: "Cuando un núcleo radiactivo emite una partícula beta, su masa no varía"
  - Una muestra radiactiva contiene, en el instante actual, la quinta parte de los núcleos que poseía hace cuatro días, ¿cuál es su vida media?
  - Reacciones de fusión nuclear, ¿de dónde procede la energía que se desprende? Ventajas y dificultades para obtener energía procedente de la fusión.
  - ¿Qué es la actividad de una muestra radiactiva?
  - Indica las características de las partículas:  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ .
  - Explica los cambios que experimenta un núcleo al emitir una partícula beta.
  - Enumera las interacciones fundamentales de la naturaleza y explica las características de cada una.
  - ¿Cómo es posible la estabilidad de los núcleos a pesar de la fuerte repulsión entre sus protones?

## Defecto de masa y estabilidad nuclear

- Discuta razonadamente la veracidad de las siguientes afirmaciones: **i)** La masa de un núcleo es siempre menor que la suma de las masas de los protones y neutrones que lo forman. **ii)** En una emisión alfa el número másico decrece en dos unidades y el número atómico en una. **(Julio 2021)**
- La masa de un núcleo atómico no coincide con la suma de las masas de las partículas que lo constituyen. ¿Es mayor o menor? ¿Cómo justifica esa diferencia? ¿Qué se entiende por estabilidad nuclear? Explique, cualitativamente, la dependencia de la estabilidad nuclear con el número másico. **(Septiembre 2017)**
- Describa brevemente las interacciones fundamentales de la naturaleza. Compare su alcance e intensidad. **(Junio 2017)**
- La masa de un núcleo atómico no coincide con la suma de las masas de las partículas que lo constituyen. ¿Es mayor o menor? ¿Cómo justifica esta diferencia?
  - ¿Qué se entiende por estabilidad nuclear? Explique cualitativamente la dependencia de la estabilidad nuclear con el número másico. **(Septiembre 2013)**
- Explique que se entiende por defecto de masa y por energía de enlace.
  - Considere los nuclidos  ${}_{90}^{232}\text{Th}$  y  ${}_{92}^{232}\text{U}$ . Si el  ${}_{90}^{232}\text{Th}$  tiene mayor energía de enlace, razone cuál de ellos es más estable. **(2010)**
- Estabilidad nuclear.



**b)** Explique el origen de la energía liberada en los procesos de fisión y fusión nucleares. **(Junio 2010)**

8. **a)** Explique el origen de la energía liberada en una reacción nuclear basándose en el balance masa-energía.

**b)** Dibuje aproximadamente la gráfica que relaciona la energía de enlace por nucleón con el número másico y, a partir de ella, justifique por qué en una reacción de fisión se desprende energía. **(Junio 2009)**

9. **a)** La masa de un núcleo atómico no coincide con la suma de las masas de las partículas que los constituyen. ¿Es mayor o menor? ¿Cómo justifica esa diferencia?

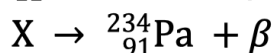
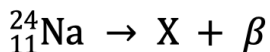
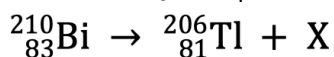
**b)** ¿Qué se entiende por estabilidad nuclear? Explique, cualitativamente, la dependencia de la estabilidad nuclear con el número másico **(Junio 2007)**

## Leyes de desplazamiento radiactivo

10. **a)** El  $^{214}_{82}\text{Pb}$  emite una partícula alfa y se transforma en mercurio (Hg) que, a su vez, emite una partícula beta y se transforma en talio (Tl). Escriba, razonadamente, las reacciones de desintegración descritas. **(Julio 2020)**

11. **a)** El  $^{210}_{83}\text{Bi}$  se desintegra mediante un proceso beta y el  $^{222}_{86}\text{Rn}$  mediante radiación alfa. Escriba y explique el proceso radiactivo de cada isótopo, determinando los números atómico y másico del nucleido resultante. **(Junio 2019)**

12. **a)** Complete, razonadamente, las reacciones nucleares siguientes especificando el tipo de nucleón o átomo representado por la letra X y el tipo de emisión radiactiva de que se trata:



**(Septiembre 2018)**

13. **a)** Describa las características de los procesos de emisión radiactiva alfa, beta y gamma. **(Septiembre 2017)**

14. **a)** Describa las características de los procesos de desintegración  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ .

**b)** Un isótopo  $^A_Z\text{X}$  sufre una desintegración  $\alpha$  y  $\gamma$ . Justifique el número másico y el número atómico del nuevo núcleo. ¿Qué cambiaría si en lugar de emitir una partícula  $\alpha$  emitiese una  $\beta$ ? **(Reserva B Septiembre 2013)**

15. **a)** Enuncie la ley de desintegración radiactiva y dibuje una gráfica que represente el número de núcleos que quedan por desintegrar a medida que pasa el tiempo.

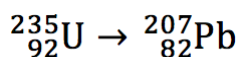
**b)** Explique las características de los diferentes tipos de desintegración radiactiva. **(2012)**

16. **a)** Describa los procesos radiactivos alfa, beta, gamma.

**b)** Razone el número de desintegraciones alfa y beta necesarias para que el  $^{226}_{88}\text{Ra}$  se transforme en  $^{206}_{82}\text{Pb}$ . **(2011)**

17. **a)** Explique qué es la radiactividad y describa en que consisten los procesos alfa, beta y gamma.

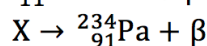
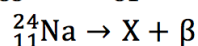
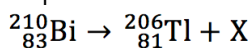
**b)** Razone cuál es el número total de emisiones alfa y beta que permiten completar la siguiente transmutación:



**(2011)**

18. **a)** Describa los procesos de desintegración radiactiva alfa, beta, gamma y justifique las leyes de desplazamiento.

**b)** Complete las reacciones nucleares siguientes especificando el tipo de nucleón o de átomo representado por la letra X y el tipo de emisión radiactiva que se trata. **(2009)**



19. **a)** Describa el origen y las características de los procesos de emisión radiactiva alfa, beta y gamma.

**b)** Indique el significado de las siguientes magnitudes: período de semidesintegración, constante radiactiva y vida media. **(2004)**

20. Si un núcleo atómico emite una partícula  $\alpha$ , dos partículas  $\beta$  y dos partículas  $\gamma$ , su número atómico:

a) Disminuye en dos unidades; b) Aumenta en dos unidades; c) No varía

## Ley de desintegración radiactiva

21. **a)** Enuncie la ley de desintegración radiactiva y enumere las magnitudes que intervienen en su expresión.

**b)** Considere dos muestras de isótopos radiactivos. Si el periodo de semidesintegración de una de ellas es el doble que el de la otra, razone como cambia la relación entre las actividades de ambas muestras en función del tiempo. **(Junio 2013)**

22. **a)** Ley de desintegración radiactiva; magnitudes.

**b)** Defina actividad de un isótopo radiactivo. Razone si puede asegurarse que dos muestras radiactivas de igual masa tienen igual actividad. **(2011)**

## Carnono-14

23. **a)** Enuncie la ley de desintegración radiactiva, identificando cada una de las magnitudes que intervienen en la misma, y defina el periodo de semidesintegración y actividad de un isótopo radiactivo.

- 
- b)** La antigüedad de una muestra de madera se puede determinar a partir de la actividad del presente en ella. Explique el procedimiento. **(2009)**
24. **a)** Comente la siguiente frase: "debido a la desintegración del  $^{14}\text{C}$ , cuando un ser vivo muere se pone en marcha un reloj..." ¿En qué consiste la determinación de la antigüedad de los yacimientos arqueológicos mediante el  $^{14}\text{C}$ ?
- b)** ¿Qué es la actividad de una muestra radiactiva? ¿De qué depende? **(2007)**
25. **a)** Algunos átomos de  $^{14}_7\text{N}$  atmosférico chocan con un neutrón y se transforman en  $^{14}_6\text{C}$  que, por emisión beta, se convierte de nuevo en nitrógeno. Escribe las correspondientes reacciones nucleares.
- b)** Los restos de animales recientes contienen mayor proporción de  $^{14}_6\text{C}$  que los restos de animales antiguos. ¿A qué se debe este hecho y qué aplicación tiene?

### Fusión y fisión nuclear

26. Represente gráficamente la energía de enlace por nucleón frente al número másico y justifique, a partir de la gráfica, los procesos de fusión y fisión nuclear. **(Junio 2021)**
27. **a)** Describa las reacciones de fisión y fusión nucleares justificando el origen de la energía liberada en ellas.
- b)** Explique por qué es tan difícil conseguir una reacción nuclear de fusión. **(2012)**
28. **a)** Estabilidad nuclear
- b)** Explique el origen de la energía liberada en los procesos de fusión y fisión nucleares. **(2010)**
29. **a)** Defina energía de enlace por nucleón.
- b)** Analice las reacciones de fusión y fisión nucleares. **(2009)**
30. **a)** Explique en qué consisten las reacciones de fusión y fisión nucleares. ¿En qué se diferencian?
- b)** Comente el origen de la energía que producen **(2008)**

# PROBLEMAS

## Defecto de masa y estabilidad nuclear

1. **b)** En el proceso de desintegración de un núcleo de  $^{218}_{84}\text{Po}$ , se emiten sucesivamente una partícula alfa y dos partículas beta, dando lugar finalmente a un núcleo de masa 213,995201 u. **i)** Escriba la reacción nuclear correspondiente. **ii)** Justifique razonadamente, cuál de los isótopos radioactivos (el  $^{218}_{84}\text{Po}$  o el núcleo que resulta tras los decaimientos) es más estable.  
 $m(^{218}_{84}\text{Po}) = 218,009007 \text{ u}$ ;  $m_p = 1,007276 \text{ u}$ ;  $m_n = 1,008665 \text{ u}$ ;  $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$  **(Junio 2021)**

2. **b)** El isótopo  $^{20}_{10}\text{Ne}$  tiene una masa atómica de 19,9924 u. Calcule su defecto de masa y la energía de enlace por nucleón.  
 $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ;  $m_p = 1,0073 \text{ u}$ ;  $m_n = 1,0087 \text{ u}$ ;  $1 \text{ u} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  **(Septiembre 2017)**

3. Considere los nucleidos  $^3_1\text{H}$  y  $^4_2\text{He}$

**a)** Defina defecto de masa y calcule la energía de enlace de cada uno.

**b)** Indique cuál de ellos es más estable y justifique la respuesta.

Datos:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ,  $u = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ,  $m(^3_1\text{H}) = 3,0160494 \text{ u}$ ,  $m(^4_2\text{He}) = 4,00260 \text{ u}$ ,  $m_p = 1,007277 \text{ u}$ ,  $m_n = 1,008665 \text{ u}$  **(2009)**

4. La masa atómica del isótopo  $^{14}_7\text{N}$  es 14.0001089 u.

**a)** Indique los nucleones de este isótopo y calcule su defecto de masa.

**b)** Calcule su energía de enlace.

Datos:  $c$ ,  $1 \text{ u} = 1.67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ,  $m_p = 1.007276 \text{ u}$ ,  $m_n = 1.008665 \text{ u}$  **(Junio 2008)**

5. **a)** Calcule el defecto de masa de los núclidos  $^{11}_5\text{B}$   $^{222}_{86}\text{Rn}$  razone cuál de ellos es más estable.

**b)** En la desintegración del núcleo  $^{222}_{86}\text{Rn}$  se emiten dos partículas alfa y una beta, obteniéndose un nuevo núcleo. Indíquese las características del núcleo resultante.

$M_B = 11.009305 \text{ u}$ ;  $M_{Rn} = 222.017574 \text{ u}$ ;  $M_p = 1.007825 \text{ u}$ ;  $M_n = 1.008665 \text{ u}$ . **(2007)**

6. Si el núcleo de un elemento químico;  $^5_2\text{X}$ , tiene una masa total de 5,0324 u, la energía de enlace por nucleón es:

a) Positiva, b) Negativa, c) Nula

Datos:  $1 \text{ u} = 1,49 \cdot 10^{-10} \text{ J}$ ;  $m_p = 1,0073 \text{ u}$ ;  $m_n = 1,0087 \text{ u}$

## Leyes de desplazamiento radiactivo

7. El isótopo radiactivo  $^{12}_5\text{B}$  se desintegra en carbono emitiendo radiación beta.

**a)** Escriba la ecuación de la reacción.

**b)** Sabiendo que las masas atómicas del boro y del carbono son 12.01435 u y 12 u respectivamente, calcule la energía que se desprendería si un mol de boro se transforma íntegramente en carbono.

---

Datos:  $c$ ,  $N_A$ ,  $m_e$  (2009)

8. El  $^{226}_{88}\text{Ra}$  se desintegra para dar  $^{222}_{86}\text{Rn}$   
a) Indique el tipo de emisión radiactiva y escriba la correspondiente ecuación.  
b) Calcule la energía liberada en el proceso.  
 $c = 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$  ;  $m_{\text{Ra}} = 225,9771 \text{ u}$  ;  $m_{\text{Rn}} = 221,9703 \text{ u}$  ;  $m_{\text{He}} = 4,0026 \text{ u}$  ;  $1 \text{ u} = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$  (Junio 2005)
9. El  $^{12}\text{B}$  se desintegra radiactivamente en dos etapas: en la primera, el núcleo resultante es  $^{12}\text{C}^*$  (estado excitado) y en la segunda, el  $^{12}\text{C}^*$  pasa a su estado fundamental.  
a) Escriba los procesos de cada etapa, determinando, razonadamente, el tipo de radiación emitida en cada caso.  
b) Calcule la frecuencia de la radiación emitida en la segunda etapa si la diferencia de energía entre los estados energéticos del isótopo del carbono es de  $4,4 \text{ MeV}$ .

Datos:  $h$ ;  $q_e$

Sol: b)  $f = 1,1 \cdot 10^{27} \text{ Hz}$

### Ley de desintegración radiactiva

10. b) Se dispone inicialmente de una muestra radiactiva que contiene  $6 \times 10^{21}$  átomos de un isótopo de Co, cuyo periodo de semidesintegración es de 77,27 días. Calcule: i) La constante de desintegración radiactiva del isótopo de Co, ii) La actividad inicial de la muestra. iii) El número de átomos que se han desintegrado al cabo de 180 días. (Julio 2020)
11. b) Los periodos de semidesintegración del  $^{210}_{83}\text{Bi}$  y del  $^{222}_{86}\text{Rn}$  son de 5 y 3,8 días, respectivamente. Disponemos de una muestra de 3 mg del  $^{210}_{83}\text{Bi}$  y otra de 10 mg del  $^{222}_{86}\text{Rn}$ . Determine en cuál de ellos quedará más masa por desintegrarse al cabo de 15,2 días. (Junio 2019)
12. b) Determine razonadamente la cantidad de  $^3_1\text{H}$  que quedará, tras una desintegración beta, de una muestra inicial de 0,1 g al cabo de 3 años sabiendo que el periodo de semidesintegración del  $^3_1\text{H}$  es 12,3 años, así como la actividad de la muestra al cabo de 3 años.  
 $m(^3_1\text{H}) = 3,016049 \text{ u}$ ;  $1 \text{ u} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  (Septiembre 2018)
13. b) El periodo de semidesintegración de un núclido radiactivo de masa atómica 109 u, que emite partículas beta, es de 462,6 días. Una muestra cuya masa inicial era de 100 g, tiene en la actualidad 20 g del núclido original. Calcule la constante de desintegración y la actividad actual de la muestra.  
 $1 \text{ u} = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$  (Junio 2017)
14. El  $^{207}_{82}\text{Pb}$  emite dos partículas beta y se transforma en polonio y, posteriormente, por emisión de una partícula alfa se obtiene plomo.  
a) Escriba las reacciones nucleares descritas.

**b)** El periodo de semidesintegración del  $^{207}_{82}\text{Pb}$  es de 22,3 años. Si teníamos inicialmente 3 moles de átomos de ese elemento y han transcurrido 100 años, ¿Cuántos núcleos radiactivos quedan sin desintegrar?

Datos:  $N_A = 6,022 \times 10^{23}$  **(Junio 2016)**

15. Disponemos de una muestra de 3 mg de  $^{226}\text{Ra}$ . Sabiendo que dicho núclido tiene un periodo de semidesintegración de 1600 años y una masa atómica de 226,025 u, determine razonadamente:

**a)** El tiempo necesario para que la masa de dicho isótopo se reduzca a 1 mg.

**b)** Los valores de la actividad inicial y la actividad final de la muestra.

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

**(Junio 2015)**

16. El isótopo  $^{235}_{92}\text{U}$  tras diversas desintegraciones  $\alpha$  y  $\beta$  da lugar al isótopo  $^{207}_{82}\text{Pb}$ .

**a)** Describa las características de esas dos emisiones radiactivas y calcule cuantas partículas  $\alpha$  y  $\beta$  que se emiten por cada átomo de  $^{207}_{82}\text{Pb}$  formado.

**b)** Determine la actividad inicial de una muestra de 1 g de  $^{235}_{92}\text{U}$  sabiendo que su periodo de semidesintegración de  $7 \times 10^8$  años. ¿Cuál será la actividad de la muestra  $^{235}_{92}\text{U}$  transcurrido un tiempo igual al periodo de semidesintegración? Justifique la respuesta.

$N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  ;  $m(^{235}_{92}\text{U}) = 235,07 \text{ u}$

**(Reserva A Septiembre 2013)**

17. Un núcleo de  $^{226}_{88}\text{Ra}$  emite una partícula alfa y se convierte en un núcleo de  $^A_Z\text{Rn}$ .

**a)** Escriba la reacción nuclear correspondiente y calcule la energía liberada en el proceso.

**b)** Si la constante de desintegración del  $^{226}_{88}\text{Ra}$  es de  $1,37 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ , calcule el tiempo que debe transcurrir para que una muestra reduzca su actividad a la quinta parte.

Datos:  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ;  $1\text{u} = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ,  $m_{\text{Ra}} = 226,025406 \text{ u}$ ,  $m_{\text{Rn}} = 222,017574 \text{ u}$ ;  $m_{\text{He}} = 4,002603 \text{ u}$ . **(2012)**

18. Un núcleo de tritio  $^3_1\text{H}$  se desintegra por emisión  $\beta$  dando lugar a un núcleo de helio.

**a)** Escriba la reacción de desintegración nuclear y explique en qué consiste la emisión  $\beta$ .

**b)** Determine razonadamente la cantidad de  $^3_1\text{H}$  que quedará de una muestra inicial de 0,1 g al cabo de tres años sabiendo que el periodo de semidesintegración del  $^3_1\text{H}$  es 12,3 años. **(2010)**

19. El  $^{210}_{83}\text{Bi}$  emite una partícula beta y se transforma en polonio que, a su vez, emite una partícula alfa y se transforma en plomo.

**a)** Escriba las reacciones de desintegración descritas.

**b)** Si el periodo de semidesintegración del es de 5 días, calcule cuántos núcleos se han desintegrado al cabo de diez días si inicialmente se tenía un mol de átomos de ese elemento.

Datos:  $N_A$  **(2009)**

20. Una sustancia radiactiva se desintegra según la ecuación:

$$N = N_0 e^{-0.005 t}$$

- a) Explique razonadamente las magnitudes que intervienen en la ecuación y determine razonadamente el periodo de semidesintegración.
- b) Si una muestra contiene en un momento dado  $10^{26}$  núcleos de dicha sustancia, ¿cuál será la actividad de la muestra al cabo de tres horas? **(2008)**
21. El período de semidesintegración del  $^{226}\text{Ra}$  es de 1620 años.
- a) Explique qué es la actividad y determine su valor para 1 g de  $^{226}\text{Ra}$ .
- b) Calcule el tiempo necesario para que la actividad de una muestra de  $^{226}\text{Ra}$  quede reducida a un dieciseisavo de su valor original.
- $N_A = 6,02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  **(Junio 2006)**
22. El núcleo radiactivo  $^{232}_{92}\text{U}$  se desintegra, emitiendo partículas alfa, con un período de semidesintegración de 72 años.
- a) Escriba la ecuación del proceso de desintegración y determine razonadamente el número másico y el número atómico del núcleo resultante.
- b) Calcule el tiempo que debe transcurrir para que su masa se reduzca al 75 % de la masa original. **(2003)**
23. El isótopo del hidrógeno denominado tritio ( $^3_1\text{H}$ ) es inestable ( $T_{1/2} = 12,5$  años) y se desintegra con emisión de una partícula beta. Del análisis de una muestra tomada de una botella de agua mineral se obtiene que la actividad debida al tritio es el 92 % de la que presenta el agua en el manantial de origen.
- a) Escriba la correspondiente reacción nuclear.
- b) Determine el tiempo que lleva embotellada el agua de la muestra. **(2003)**
24. El  $^{131}\text{I}$  es un isótopo radiactivo que se utiliza en medicina para el tratamiento del hipertiroidismo, ya que se concentra en la glándula tiroides. Su período de semidesintegración es de 8 días.
- a) Explique cómo ha cambiado una muestra de 20 mg de  $^{131}\text{I}$  tras estar almacenada en un hospital durante 48 días
- b) ¿Cuál es la actividad de un microgramo de  $^{131}\text{I}$ ?
- Dato:  $N_A$
- Sol:** a)  $m = 0,31 \text{ mg}$  ; b)  $A = 4,6 \cdot 10^9 \text{ núcleos/segundo}$
25. El período de semidesintegración de un nucleido radiactivo de masa atómica 200 u, que emite partículas beta, es de 50 s. Una muestra, cuya masa inicial era de 50 g, contiene en la actualidad 30 g del nucleido original.
- a) Indica las diferencias entre el nucleido original y el resultante y representa gráficamente la variación con el tiempo de la masa de nucleido original.
- b) Calcule la antigüedad de la muestra y su actividad actual.
- Dato:  $N_A$
- Sol:** b)  $t = 36,8 \text{ s}$  ;  $A = 12,5 \cdot 10^{20} \text{ Bq}$

26. El período de semidesintegración del  $^{60}\text{Co}$  es de 5,27 años. Calcula la actividad radiactiva de una muestra que inicialmente contiene  $10^{22}$  átomos de  $^{60}\text{Co}$ ; Cuánto tiempo tarda la actividad de esta muestra en reducirse a la octava parte de la inicial?

**Sol:** a)  $A = 1,315 \cdot 10^{21}$  átomos/año ; b)  $t = 15,81$  años

27. En el potasio natural se encuentra actualmente un 0,012% del isótopo radiactivo  $^{40}\text{K}$ . Todos los demás isótopos presentes son núcleos estables  $^{39}\text{K}$ , en una proporción del 93,1% y  $^{41}\text{K}$ , en un 6.888%.

a) Calcula la actividad de una muestra de 10 g de potasio

b) Suponiendo que cuando se formaron los núcleos de potasio, en la etapa de la nucleosíntesis, el  $^{39}\text{K}$  y el  $^{40}\text{K}$  se formaron en la proporción 30:1 y que el  $^{41}\text{K}$  se formó en la misma proporción respecto del  $^{39}\text{K}$  que tiene en la actualidad, calcula el tiempo transcurrido desde entonces ( como múltiplo del período de semidesintegración del  $^{40}\text{K}$ , y también en años). Compara ese tiempo con la edad del universo

Datos: Peso atómico del potasio; número de Abogador;  $T_{1/2}$  del  $^{40}\text{K} = 1,28 \cdot 10^9$  años; edad del Universo =  $1,15 \cdot 10^{10}$  años

**Sol:** a)  $A = 309,8$  Bq ; b)  $1,02 \cdot 10^{10}$  años ; 13% de la edad del Universo

## Carbono-14

28. **b)** El  $^{14}_6\text{C}$  se desintegra en  $^{14}_7\text{N}$  y emite una partícula beta, con un periodo de semidesintegración de 5736 años. Escriba la ecuación del proceso de desintegración y calcule la edad de unos tejidos encontrados en una tumba cuya actividad debida al  $^{14}_6\text{C}$  es del 40% de la que presentan los tejidos similares actuales. **(Septiembre 2017)**

29. Entre unos restos arqueológicos de edad desconocida se encuentra una muestra de carbono en la que solo queda una octava parte del  $^{14}\text{C}$  que contenía originalmente. El periodo de semidesintegración del  $^{14}\text{C}$  es de 5730 años.

**a)** Calcule la edad de dichos restos.

**b)** Si en la actualidad hay  $10^{12}$  átomos de  $^{14}\text{C}$  en la muestra, ¿cuál es su actividad? **(Junio 2012)**

30. La actividad de  $^{14}\text{C}$  de un resto arqueológico es de 150 desintegraciones por segundo. La misma masa de una muestra actual de idéntico tipo posee una actividad de 450 desintegraciones por segundo. El periodo de semidesintegración del  $^{14}\text{C}$  es de 5730 años.

**a)** Explique qué se entiende por actividad de una muestra radiactiva y calcule la antigüedad de la muestra arqueológica.

**b)** ¿Cuántos átomos de  $^{14}\text{C}$  tiene la muestra arqueológica indicada en la actualidad? Explique por qué ha cambiado con el tiempo el número de átomos de  $^{14}\text{C}$  de la muestra. **(2011)**

## Fusión y fisión nuclear

31. **b)** En la bomba de Hidrógeno (o bomba de fusión) intervienen dos núcleos, uno de deuterio ( $^2_1\text{H}$ ) y otro de tritio ( $^3_1\text{H}$ ) que dan lugar a uno de helio ( $^4_2\text{He}$ ). **i)** Escriba la reacción



nuclear correspondiente. **ii)** Obtenga la energía liberada en el proceso por cada átomo de helio obtenido.

$m({}_2^4\text{He}) = 4,002603 \text{ u}$ ;  $m({}_1^2\text{H}) = 2,014102 \text{ u}$ ;  $m({}_1^3\text{H}) = 3,016049 \text{ u}$ ;  $m_n = 1,008665 \text{ u}$ ;  $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$  **(Julio 2021)**

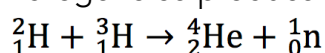
32. En las estrellas de núcleos calientes predominan las fusiones del denominado ciclo de carbono, cuyo último paso consiste en la fusión de un protón con nitrógeno  ${}^{15}_7\text{N}$  para dar  ${}^{12}_6\text{C}$  y un núcleo de helio.

**a)** Escriba la reacción nuclear.

**b)** Determina la energía necesaria para formar 1 kg de  ${}^{12}_6\text{C}$ .

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ;  $m({}_1^1\text{H}) = 1,007825 \text{ u}$ ;  $m({}^{15}_7\text{N}) = 15,000108 \text{ u}$ ;  $m({}^{12}_6\text{C}) = 12,000000 \text{ u}$ ;  $m({}_2^4\text{He}) = 4,002603$ ;  $u = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$  **(Junio 2013)**

33. En la explosión de una bomba de hidrógeno se produce la reacción:



**a)** Defina defecto de masa y calcule la energía de enlace por nucleón del

**b)** Determine la energía liberada en la formación de un átomo de helio.

Datos:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ,  $m({}_1^2\text{H}) = 2,01474 \text{ u}$ ,  $m({}_1^3\text{H}) = 3,01700 \text{ u}$ ;  $m({}_2^4\text{He}) = 4,00388 \text{ u}$ ;  $m({}_0^1\text{n}) = 1,0087 \text{ u}$ ;  $1 \text{ u} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

34. La fisión de un átomo de  ${}^{235}_{92}\text{U}$  se produce por captura de un neutrón, siendo los productos principales de este proceso  ${}^{144}_{56}\text{Ba}$  y  ${}^{90}_{36}\text{Kr}$ .

**a)** Escriba y ajuste la reacción nuclear correspondiente y calcule la energía desprendida por cada átomo que se fisiona.

**b)** En una determinada central nuclear se liberan mediante fisión  $45 \cdot 10^8 \text{ W}$ . Determine la masa material fisionable que se consume cada día.

Datos:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ,  $m_{\text{U}} = 235,12 \text{ u}$ ,  $m_{\text{Ba}} = 143,92 \text{ u}$ ;  $m_{\text{Kr}} = 89,94 \text{ u}$ ;  $m_n = 1,008665 \text{ u}$ ;  $1 \text{ u} = 1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ . **(Junio 2011)**

35. Para controlar la fusión nuclear se está construyendo en Cadarache (Francia) el ITER (Reactor Internacional de Fusión Termonuclear). Se pretende fusionar el deuterio,  ${}_1^2\text{H}$ , y tritio,  ${}_1^3\text{H}$ , para dar lugar al  ${}_2^4\text{He}$ .

**a)** Escriba la reacción nuclear.

**b)** Determine la energía liberada en la formación de 0,1 g de  ${}_2^4\text{He}$

Datos:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ,  $m({}_1^2\text{H}) = 2,01474 \text{ u}$ ,  $m({}_1^3\text{H}) = 3,01700 \text{ u}$ ;  $m({}_2^4\text{He}) = 4,00388 \text{ u}$ ;  $m({}_0^1\text{n}) = 1,0087 \text{ u}$ ;  $1 \text{ u} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ . **(2010)**