

FÍSICA NUCLEAR

En esta Unidad analizaremos algunos fenómenos que tienen lugar en el núcleo de los átomos. Después de revisar las partículas que forman el núcleo atómico, se presentan las características de la fuerza que las mantiene unidas y se define la *energía de enlace*. Introduciremos las características de la radiactividad, así como la ley que sigue la desintegración de los núcleos inestables. Por último, observaremos que el número de nucleones y la carga eléctrica se conservan en las reacciones nucleares, mientras que la energía desprendida en ellas se explica por la conversión en energía del defecto de masa que tiene lugar. Los conceptos relacionados con la desintegración radiactiva, la energía de enlace, la ley de desintegración radiactiva y las relaciones nucleares aparecen con mucha frecuencia en las Pruebas de Acceso a la Universidad.



12

NÚCLEO ATÓMICO

Fuerza nuclear

Energía de enlace

LEY DE LA DESINTEGRACIÓN RADIATIVA

Constante de desintegración

Período de semidesintegración

Actividad

DESINTEGRACIÓN RADIATIVA

Radiaciones α , β y γ

Leyes de Soddy

Familias radiactivas

REACCIONES NUCLEARES

Leyes de conservación

Reacciones de fusión

Reacciones de fisión

12.1 Núcleo atómico

Los átomos están formados por el **núcleo** y la **corteza**. En esta se encuentran los electrones. En el núcleo se localizan los protones y los neutrones que se llaman **nucleones**.



El número de protones del núcleo, que coincide con el de electrones de la corteza, se llama **número atómico**. Se representa por la letra Z .



El **número másico** o **masa atómica** de un átomo es igual a la suma del número de protones y de neutrones que lo forman. Se representa por la letra A .

Un **elemento** está formado por átomos que tienen el mismo número atómico.

Un átomo (o un núcleo) de número másico A y número atómico Z se representa como A_ZX , siendo X el símbolo del elemento. Por ejemplo, ${}^{235}_{92}\text{U}$ representa un átomo o un núcleo de uranio.

Los **isótopos** son los átomos que tienen el mismo número atómico y diferente número másico. Por ejemplo, ${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$ y ${}^3_1\text{H}$ son isótopos del hidrógeno.

La masa de un átomo es muy pequeña. Por esa razón, el gramo no es una unidad adecuada para medirla. Se utiliza la **unidad de masa atómica (u)**, definida como la masa de la doceava parte de la masa de un átomo de ${}^{12}_6\text{C}$.



Recuerda

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



Recuerda

En el núcleo existe una fuerza llamada **nuclear débil**. Esta fuerza es la responsable de la desintegración beta.

Las dos fuerzas nucleares, junto con la gravitatoria y la electromagnética, constituyen las cuatro fuerzas fundamentales de la naturaleza. En la Tabla 12.1 se incluyen las intensidades relativas de estas fuerzas.

Fuerza	Intensidad	Alcance (m)
Fuerte	1	10^{-15}
Electromagnética	10^{-2}	Infinito
Débil	10^{-5}	10^{-18}
Gravitatoria	10^{-38}	Infinito

Tabla 12.1. Fuerzas fundamentales de la naturaleza.



EJEMPLO 1

El cloro natural está formado por un 75 % de ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ y un 25 % de ${}^{37}_{17}\text{Cl}$. Calcula la masa atómica del cloro natural.

Solución

En cien partes de cloro natural hay 75 del isótopo ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ y 25 de ${}^{37}_{17}\text{Cl}$. Como las masas atómicas de los isótopos son 35 y 37 u respectivamente, la masa de esas cien partes de cloro natural será $75 \cdot 35 \text{ u} + 25 \cdot 37 \text{ u}$. Por tanto, la masa de una parte vendrá dada

$$\text{por } \frac{75 \cdot 35 \text{ u} + 25 \cdot 37 \text{ u}}{100} = 35,5 \text{ u}$$

A. Fuerza nuclear

El núcleo de los átomos está formado por los protones, que tienen carga positiva, y los neutrones, que no están cargados. Las fuerzas repulsivas entre las cargas de los protones harían que el núcleo fuera inestable. Esto no sucede porque la fuerza eléctrica se equilibra con una fuerza atractiva denominada **fuerza nuclear**, que se caracteriza por lo siguiente:

- Es de corto alcance. Su radio de acción es de unos 10^{-15} m. Esta longitud se conoce como *femtómetro* o *fermi*.
- Es atractiva y no depende de la carga. Se ejerce entre los protones, entre los neutrones y entre los protones y los neutrones. A distancias muy cortas, mucho menores que las del alcance la fuerza del núcleo, se hace repulsiva.
- Su intensidad es muy elevada, cien veces mayor que la fuerza electromagnética.

B. Energía de enlace

La masa de cualquier núcleo siempre es inferior a la suma de las masas de los nucleones que lo forman. La diferencia entre los dos números se llama **defecto de masa**.

El equivalente en energía del defecto de masa, que se libera cuando se forma el núcleo, recibe el nombre de *energía de enlace*, que se define como

La **energía de enlace o de ligadura** de un núcleo es la energía liberada en la formación de este a partir de los nucleones libres, o la necesaria para disgregar un núcleo y separar sus nucleones.

Observa



La energía de enlace de las partículas que forman un núcleo es mucho mayor que la energía de enlace entre átomos. La primera es del orden de los MeV y la segunda, de los eV.

Si se divide la energía de enlace de un núcleo por el número de nucleones que lo forman, se obtiene la **energía de enlace por nucleón**.

La energía de enlace por nucleón está relacionada con la estabilidad de los núcleos. Un núcleo será tanto más estable cuanto mayor sea la energía que hace falta comunicarle para que los nucleones dejen de estar ligados entre sí. Esta energía coincide con la energía que se libera cuando se forma el núcleo a partir de nucleones libres, como veremos a continuación.

Estabilidad nuclear

En la mayoría de los nucleidos estables naturales, el número de neutrones es igual o mayor que el número de protones. Si representamos gráficamente (Fig. 12.1) el número de neutrones frente al de protones, obtenemos una curva que corresponde a los nucleidos estables.

En internet



En la gráfica de estabilidad nuclear interactiva que aparece en la página Lectureonline relativa a física Nuclear (<http://lectureonline.cl.msu.edu/~mmp/kap30/Nuclear/nuc.htm>) se muestran diversos datos de todos los núcleos estables e inestables.

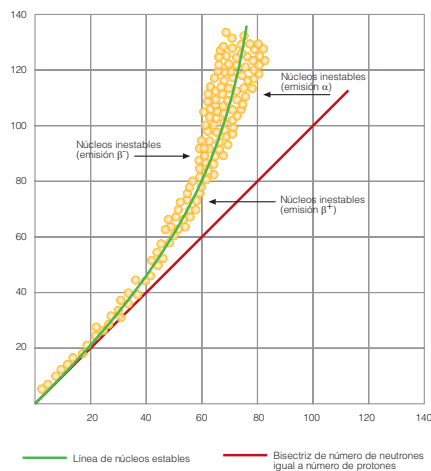


Fig. 12.1. Curva de estabilidad nuclear.

Se observa lo siguiente:

- Los núcleos ligeros están situados en la bisectriz del cuadrante porque poseen el mismo número de protones que de neutrones ($A - Z = N = Z$).
- Para $Z > 20$, la curva se eleva por encima de la bisectriz, lo que indica que el número de neutrones de los núcleos pesados se hace algo mayor que el número de protones. Esto aumenta su estabilidad porque el exceso de neutrones hace que disminuya la repulsión eléctrica de los protones, al intercalarse los neutrones entre ellos.

Los nucleidos artificiales son inestables, porque se desvían de la curva de estabilidad.

La fuerza nuclear fuerte se debilita si hay más protones que neutrones en el núcleo.

□ Defecto de masa

La masa de un núcleo es menor que la de sus nucleones libres; es lo que hemos definido como defecto de masa (Δm). Esto indica que el núcleo es más estable que sus partículas libres (tiene menos energía).

Para calcular la energía de enlace de un núcleo, E_b , será necesario tener en cuenta este defecto de masa, es decir, habrá que considerar la diferencia de masa de los nucleones libres respecto a la del núcleo.

□ Energía de enlace por nucleón

Si la energía nuclear se divide por el número de nucleones (número másico A), se obtiene la energía media de enlace por nucleón:

$$\frac{E_b}{A}$$



Se define la **energía media de enlace por nucleón** $\frac{E_b}{A}$ como la energía que se libera al añadir a un núcleo uno de sus nucleones constituyentes.

La energía de enlace por nucleón es una medida objetiva de la estabilidad de un núcleo.

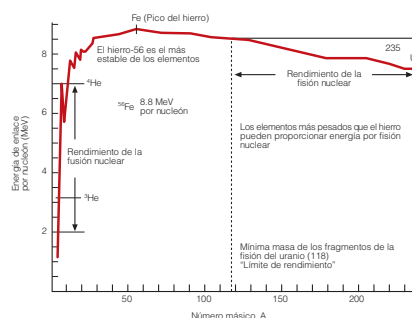


Fig. 12.2. Variación de la energía de enlace por nucleón en función del número másico.

En la Fig. 12.2 se ha representado la energía de enlace por nucleón en función del número másico. Se observa lo siguiente:

- En los núcleos ligeros se produce un aumento abrupto de la energía de enlace por nucleón frente al número másico A , en los átomos más ligeros.
- El valor de la energía de enlace por nucleón es del orden de 8 MeV para los elementos con A superior a 20.
- El máximo corresponde a un número másico de 56, es decir, al núcleo de ${}_{26}^{56}\text{Fe}$, que es el más estable de la naturaleza.
- Cuando el número másico varía entre 40 y 80, los valores de la energía de enlace por nucleón son máximos. Los núcleos correspondientes a esos valores del número másico serán los más estables.
- Las variaciones de la energía de enlace por nucleón son pequeñas para números másicos superiores a 20. Este hecho significa que la fuerza nuclear no aumenta por hacerlo el número de nucleones. La fuerza nuclear se ejerce entre los nucleones más próximos y es independiente del número total de nucleones. Esta característica de la fuerza nuclear se llama **saturación**.

EJEMPLO 2



La energía de enlace del núcleo de ${}^4_2\text{He}$ es 28,296 MeV. Calcula la energía, expresada en julios, que se desprende cuando se forman 0,5 g de helio a partir de protones y neutrones que se encuentran libres.

Número de Avogadro = $6,023 \cdot 10^{23}$ núcleos/mol.

Masa atómica relativa de ${}^4_2\text{He}$ = 4,002603 u.

Solución

Calculamos cuántos moles son 0,5 gramos de ${}^4_2\text{He}$. Tendremos que $n = \frac{m}{M_r}$, donde m es la masa dada expresada en gramos y M_r es el valor de la masa de un mol expresada también en gramos. En este caso, $n = \frac{m}{M_r} = \frac{0,5 \text{ g}}{4,002603 \text{ g/mol}} = 0,12 \text{ mol}$.

El número de núcleos que hay en 0,12 moles es

$$0,12 \text{ mol} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \text{ núcleos/mol} = 7,23 \cdot 10^{22} \text{ núcleos}$$

Como la energía liberada en la formación de un núcleo es 28,296 MeV, la energía pedida será

$$7,23 \cdot 10^{22} \text{ núcleos} \cdot 28,296 \text{ MeV/núcleo} = 2,05 \cdot 10^{24} \text{ MeV}$$

Convertimos en julios el valor de la energía expresado en MeV:

$$2,05 \cdot 10^{24} \text{ MeV} = 2,05 \cdot 10^{24} \cdot 10^6 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \frac{\text{J}}{\text{eV}} = 3,28 \cdot 10^{11} \text{ J}$$

EJEMPLO 3



Las energía de enlace de los núcleos de ${}^{10}_5\text{B}$, ${}^{11}_5\text{B}$ y ${}^{12}_5\text{B}$ son respectivamente 64,751, 76,205 y 79,575 MeV.

a) Calcula la energía de enlace por nucleón.

b) Justifica cuál de los núcleos anteriores es más estable.

Solución

a) El número atómico de un núcleo indica el número de protones que lo forman. En el caso del núcleo de ${}^{10}_5\text{B}$, el subíndice indica que en el núcleo hay 5 protones. Como el número másico de un núcleo es igual al número de protones y de neutrones, tendremos que en el núcleo indicado existen $10 - 5 = 5$ neutrones. El número total de nucleones será $5 + 5 = 10$. Este valor coincide con el del número másico.

La energía de enlace por nucleón se obtiene dividiendo la energía de enlace por el número total de nucleones:

$$E_{\text{ent,nucleón}} = \frac{E_{\text{ent}}}{\text{número de nucleones}} = \frac{64,751 \text{ MeV}}{10} = 6,475 \text{ MeV}$$

Si se repite el procedimiento con los núcleos de ${}^{11}_5\text{B}$ y ${}^{12}_5\text{B}$, se obtiene respectivamente:

$$E_{\text{ent,nucleón}} = \frac{70,205 \text{ MeV}}{11} = 6,382 \text{ MeV}$$

$$E_{\text{ent,nucleón}} = \frac{79,575 \text{ MeV}}{12} = 6,631 \text{ MeV}$$

12.2 Desintegración radiactiva

En 1896 Becquerel descubrió que una sal de uranio velaba un papel fotográfico. Posteriormente Marie Curie comprobó que otros elementos pesados, como el radio y el polonio, presentaban el mismo fenómeno llamado *radioactividad*.



La **radiactividad** es la desintegración espontánea de núcleos pesados inestables.

La radiactividad es una propiedad característica del núcleo. Si una sustancia radiactiva reacciona químicamente con otros compuestos, la radiactividad permanece.



Física cotidiana

Alimentos irradiados

Se puede prolongar la duración de los alimentos frescos perecederos sometiéndolos a una exposición de rayos gamma. De esta forma, se matan los microbios, bacterias e insectos que producen la putrefacción. Los rayos gamma pasan fácilmente a través del envoltorio del producto sin producir cambios en los núcleos aunque pueden romper algunos enlaces químicos.

Detectores de humo

En los detectores de humo existe una pequeña cantidad del isótopo radiactivo americio-241. Cuando las partículas alfa emitidas por el isótopo chocan con las moléculas de oxígeno y de nitrógeno del aire, se ionizan. Si se aplica una diferencia de potencial entre dos electrodos, los iones son atraídos por uno de ellos y se produce una corriente eléctrica. Las partículas de humo tienen la propiedad de absorber las partículas alfa. En el caso de que se produzca un incendio, disminuirá el número de partículas ionizadas y, por tanto, la intensidad de la corriente, lo que activa un mecanismo de alarma.

A. Clases de radiaciones

En la desintegración radiactiva se emiten tres clases de radiación llamadas **alfa**, **beta** y **gamma**. Estas radiaciones se caracterizan por su poder de penetración en la materia y por ionizar el aire, es decir, convertir en iones las moléculas del aire. La primera propiedad está relacionada con la masa y la segunda con la carga eléctrica.

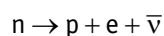
Los rayos alfa son núcleos de helio, los beta están formados por electrones, mientras que los rayos gamma son ondas electromagnéticas de frecuencia muy alta. En la Tabla 12.2 se muestran otras propiedades de las radiaciones.

Radiación	Masa	Carga	Poder de penetración	Poder de ionización
Alfa	4 u	+2	Absorbida por una hoja de papel	Muy grande
Beta	1/1840 u	-1	Absorbida por una hoja de aluminio	Menor que la radiación alfa
Gamma	0	0	Absorbida por un bloque de plomo	Muy pequeño

Tabla 12.2. Propiedades de las radiaciones alfa, beta y gamma.

La desintegración alfa se presenta en los núcleos de elementos con un número atómico muy grande (Fig. 12.2).

La desintegración beta es propia de los núcleos que tienen muchos nucleones (Fig. 12.2). El electrón emitido no está en el interior del núcleo. En realidad, se produce la desintegración de un neutrón del núcleo en un protón, un electrón y un antineutrino, de acuerdo con el siguiente proceso:



En la desintegración gamma un núcleo excitado pasa al estado fundamental emitiendo radiación electromagnética. Igual que ocurre en la corteza de los átomos con los electrones, los protones y los neutrones se encuentran en los núcleos en niveles energéticos determinados. Cuando están en otros niveles de energía mayor, se dice que el núcleo está excitado. Un núcleo excitado pasa al estado fundamental emitiendo una energía, en forma de onda electromagnética, igual a la diferencia de energía que existe entre el nivel inicial y final.

Las desintegraciones anteriores, igual que las reacciones nucleares que se verán posteriormente en esta Unidad, se escriben en forma de ecuación química. Por ejemplo, la desintegración del uranio ${}_{92}^{238}\text{U}$ cuando emite una partícula alfa se escribe como: ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$

En las reacciones nucleares se cumple lo siguiente:

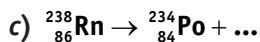
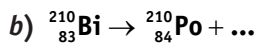
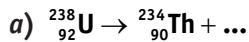
- Se conserva el número de nucleones. La suma de los superíndices de los núcleos situados a la izquierda de la flecha ha de ser igual a la suma de los superíndices de los que se encuentran a la derecha.
- La carga se conserva. El subíndice de la representación simbólica de un núcleo indica su carga. Por tanto, la suma de los subíndices de los núcleos situados a la izquierda de la flecha es igual a la suma de los que se encuentran a la derecha.
- También se conserva la masa-energía y la cantidad de movimiento.

Por ejemplo, en la desintegración ${}_{92}^{238}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{234}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$, se conserva el número de nucleones. Para los superíndices se cumple que $238 = 234 + 4$. También se verifica para los subíndices que $92 = 90 + 2$. Por tanto, se conserva la carga.

EJEMPLO 4

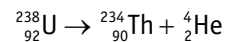


Completa las siguientes desintegraciones:

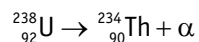


Solución

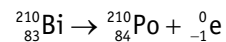
a) Como se cumple la conservación del número de nucleones y de la carga, el superíndice de la partícula que falta es $238 - 234 = 4$, y el subíndice, $92 - 90 = 2$. La partícula es ${}_2^4\text{He}$, es decir, una partícula alfa. La reacción completa se puede escribir como



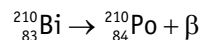
o bien,



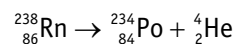
b) En este caso, el superíndice de la partícula es $210 - 210 = 0$, y el subíndice, $83 - 84 = -1$. Se trata del electrón ${}_{-1}^0\text{e}$. La reacción será



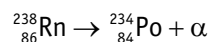
o bien,



c) Aplicando el mismo procedimiento que en los casos anteriores, el superíndice se calcula como $238 - 234 = 4$. El subíndice es $96 - 84 = 2$. La partícula emitida es el ${}_2^4\text{He}$, y la reacción,



o bien,



Recuerda



Para completar las reacciones nucleares debes recordar de memoria las características de las partículas que aparecen en la página 291.

**Observa**

Las leyes de Soddy son una consecuencia de la conservación del número de nucleones y de la carga que se cumple en las reacciones nucleares.

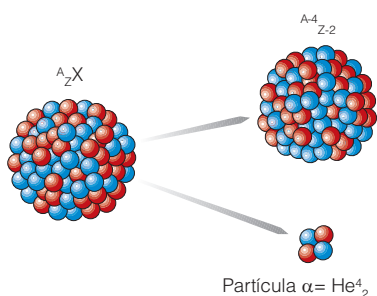


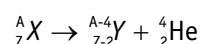
Fig. 12.3. Desintegración alfa.

B. Leyes de Soddy

Cuando un núcleo radiactivo se desintegra, emite radiación alfa, beta o gamma y se convierte en otro núcleo diferente del original. Las leyes de Soddy o del desplazamiento radiactivo permiten deducir el núcleo formado.

Desintegración alfa

Si un núcleo emite partículas alfa, se forma otro cuyo número másico es cuatro unidades inferior al del núcleo original y cuyo número atómico es dos unidades inferior de acuerdo con la siguiente reacción nuclear (Fig. 12.3), donde X e Y son los nucleidos original y el formado respectivamente:



El proceso de desintegración α va acompañado de la emisión de una gran cantidad de energía que proviene del defecto de masa que experimenta el conjunto y que se reparte en forma de energía cinética entre el núcleo formado y la partícula α .

Durante la desintegración α , las partículas emitidas alcanzan velocidades en torno a 10^4 km/s, lo que equivale a una energía cinética del orden de MeV. Su poder de penetración no va más allá de la piel del cuerpo humano.

Desintegración beta

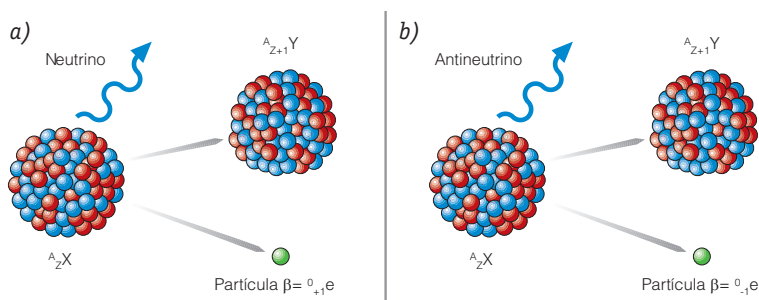
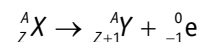


Fig. 12.4. Desintegración beta: a) menos; b) más.

Cuando se produce la emisión de partículas beta por un núcleo, se forma otro cuyo número másico no cambia y cuyo número atómico es una unidad superior. La desintegración β produce electrones mediante la siguiente reacción nuclear (Fig. 12.4):



La desintegración β se produce porque los nucleidos inestables tienen demasiados neutrones. Dichos nucleidos alcanzan la estabilidad emitiendo electrones.

Estas transformaciones tienen lugar como resultado de la interacción débil.

La energía de los electrones emitidos es del orden de MeV y su poder de penetración el de placas metálicas.

Desintegración gamma

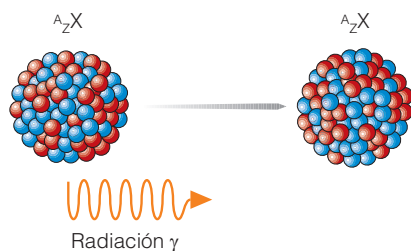
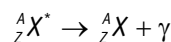


Fig. 12.5. Desintegración gamma.

Cuando un núcleo emite radiación gamma, pasa de un estado excitado (X^*) al fundamental (X). Por tanto, no cambia el número másico ni el atómico (Fig. 12.5).



La radiación γ está formada por fotones de energía muy alta, del orden de algunos MeV. Es una emisión que acompaña a las radiaciones α y β .

Los rayos γ emitidos son fotones de una energía igual a la diferencia de energía del núcleo excitado y del estable.

C. Familias radiactivas

Cuando un núcleo se desintegra, se forma otro que a su vez puede volver a desintegrarse. Este proceso se repite sucesivamente hasta que se obtiene un núcleo estable. El conjunto de núcleos que se forman partiendo de uno inicial hasta llegar a otro estable se llama **familia o serie radiactiva**.

Existen tres familias radiactivas:

Familia del uranio-238	Comienza con el núcleo de uranio $^{238}_{92}\text{U}$ y termina en el núcleo de plomo $^{206}_{82}\text{Pb}$.
Familia del actinio (uranio-235)	Comienza con el núcleo de uranio $^{235}_{92}\text{U}$ y termina en el núcleo de plomo $^{207}_{82}\text{Pb}$.
Familia del torio	Comienza con el núcleo de torio $^{232}_{90}\text{Th}$ y termina en el núcleo de plomo $^{208}_{82}\text{Pb}$.

12.3 Ley de la desintegración radiactiva

Si una muestra de un material radiactivo está formada por N_0 núcleos y, después de un tiempo t , quedan N núcleos sin desintegrar, se puede demostrar que se cumple

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

donde λ es la **constante de desintegración** o **constante radiactiva**, que tiene un valor característico para cada sustancia radiactiva. Si la constante radiactiva de una sustancia es grande, la velocidad de desintegración también lo es. Cuanto mayor sea esta constante, más radiactiva será la muestra.

El **período de semidesintegración** $T_{1/2}$ es el tiempo que tarda un muestra que contiene un número de núcleos en desintegrarse la mitad de ellos. Se cumple que $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$.

En la Fig. 12.6 se observa que los núcleos radiactivos se desintegran siguiendo una ley exponencial. Cuando pasa un tiempo igual al periodo de semidesintegración, solamente quedan la mitad de los núcleos.

La **actividad A** o **velocidad de desintegración** de una sustancia radiactiva que contiene N núcleos es $A = \lambda N$.

La unidad en el Sistema Internacional es el *becquerel* (Bq), que equivale a 1 desintegración/segundo.

Como la actividad A y la masa m de una sustancia radiactiva son directamente proporcionales al número de núcleos N , se cumple que $A = A_0 e^{-\lambda t}$ y $m = m_0 e^{-\lambda t}$, donde A_0 es la actividad inicial, y A , la actividad al cabo de un tiempo t . De la misma forma, m_0 es la masa inicial, y m , la masa cuando ha transcurrido un tiempo t .

Observa



Las familias radiactivas se representan gráficamente de la forma que se indica en la figura. Los núcleos se sitúan como puntos en un sistema de coordenadas cuyos ejes indican la masa y el número atómico. Las desintegraciones alfa se representan por flechas oblicuas y las beta por flechas horizontales.

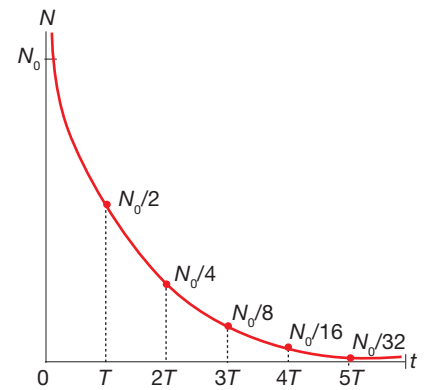
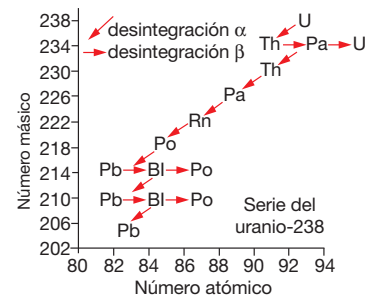


Fig. 12.7.

Observa



Para resolver problemas PAU de desintegración radiactiva hay distintas opciones. Las ecuaciones de la masa y la actividad son las más directas. A veces hay que calcular el número de moles de la muestra, para lo que se necesita el número de Avogadro.

**Errores típicos**

En la ley de desintegración radiactiva $N = N_0 e^{-\lambda t}$, N representa el número de núcleos que quedan sin desintegrar después de un tiempo t . Los núcleos que se han desintegrado vienen dados por $N_0 - N$.

**En internet**

En la página

<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/desintegracion/radio.htm>

puedes encontrar una animación en la que se simula la desintegración de una sustancia radiactiva.

**EJEMPLO 5**

La actividad inicial de una sustancia radiactiva es $7,91 \cdot 10^{16}$ Bq y el periodo de semidesintegración, $2,72 \cdot 10^6$ s. Calcular:

- El número inicial de núcleos.
- El número de núcleos que quedarán sin desintegrar cuando hayan pasado 5 días.
- La actividad en ese instante.

Solución

- a) La actividad inicial viene dada por $A_0 = \lambda N_0$, siendo N_0 el número inicial de núcleos. Por tanto, es necesario calcular previamente el valor de la constante radiactiva λ . La relación entre el periodo de semidesintegración y la constante radiactiva es:

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

Despejando λ , resulta $\lambda = \frac{\ln 2}{T}$. Por tanto,

$$\lambda = \frac{\ln 2}{2,72 \cdot 10^6 \text{ s}} = 2,55 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$$

- b) Utilizando la expresión de la actividad inicial $A_0 = \lambda N_0$ y sustituyendo los datos, resulta:

$$N_0 = \frac{A_0}{\lambda}$$

El valor de N_0 será

$$N_0 = \frac{7,91 \cdot 10^{16} \text{ Bq}}{2,55 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}} = 3,10 \cdot 10^{23} \text{ núcleos}$$

- c) El tiempo se ha de expresar en segundos. Por tanto,

$$t = 5 \text{ días} = 5 \text{ días} \cdot 24 \frac{\text{horas}}{\text{día}} \cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{hora}} \cdot 60 \frac{\text{s}}{\text{min}} = 4,32 \cdot 10^5 \text{ s}$$

Sustituyendo los datos en la ley de la desintegración radiactiva $N = N_0 e^{-\lambda t}$, tendremos

$$\begin{aligned} N &= 3,10 \cdot 10^{23} \text{ núcleos} \cdot e^{-2,55 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1} \cdot 4,32 \cdot 10^5 \text{ s}} = 3,10 \cdot 10^{23} \text{ núcleos} \cdot e^{-0,11} = \\ &= 2,78 \cdot 10^{23} \text{ núcleos} \end{aligned}$$

La actividad se calcula utilizando la expresión $A = \lambda N$, siendo N el número de núcleos que quedan sin desintegrar. Si se sustituyen los datos, resulta

$$\begin{aligned} A &= 2,55 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1} \cdot 2,78 \cdot 10^{23} \text{ núcleos} = 2,63 \cdot 10^{16} \text{ desintegraciones/s} = \\ &= 2,63 \cdot 10^{16} \text{ Bq} \end{aligned}$$

12.4 Reacciones nucleares



Las **reacciones nucleares** son procesos en los que intervienen directamente los núcleos atómicos transformándose en otros distintos.

En toda reacción nuclear se cumplen los siguientes principios de conservación:

- **Conservación del número de nucleones.** La suma de los números másicos de los reactivos es igual a la suma de los números másicos de los productos.
- **Conservación de la carga eléctrica.** La suma de los números atómicos de los reactivos coincide con la suma de los números atómicos de los productos.
- **Conservación de la cantidad de movimiento.** La cantidad de movimiento total de los reactivos es igual que la de los productos.
- **Conservación de la masa-energía.** La diferencia entre la masa total de los reactivos y la de los productos se transforma en energía según el principio de equivalencia masa-energía:

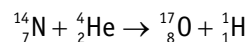
$$E = \Delta m c^2$$

Si la diferencia de masas es positiva, la reacción desprende energía. Cuando la diferencia de masas resulta negativa, es necesario proporcionar energía para que tenga lugar la reacción, como se puede ver en el Ejemplo 6.

$$\Delta m = \sum m_{\text{reactivos}} - \sum m_{\text{productos}} \begin{cases} \Delta m > 0 \Rightarrow E > 0 \rightarrow \text{Proceso exoenergético} \\ \Delta m < 0 \Rightarrow E < 0 \rightarrow \text{Proceso endoenergético} \end{cases}$$

De acuerdo con la definición vista anteriormente, las desintegraciones alfa, beta y gamma se pueden considerar como reacciones nucleares espontáneas.

La primera reacción nuclear fue realizada por Rutherford. Dirigió un haz de partículas alfa a un recipiente con nitrógeno gaseoso y observó que se producía oxígeno y se desprendían protones. Esta reacción se puede escribir, igual que las reacciones químicas, de la forma siguiente:



donde ${}^1_1\text{H}$ representa un protón.

También se utiliza la notación ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, p){}^{17}_8\text{O}$. En el interior del paréntesis aparecen las partículas incidente y emergente. El núcleo inicial y el final se escriben, respectivamente, a la izquierda y a la derecha del paréntesis.

Por la conservación del número de nucleones, la suma de los superíndices de los núcleos y partículas que aparecen a la izquierda de la reacción anterior ha de coincidir con la correspondiente de los núcleos y partículas que aparecen a la derecha. Lo mismo sucede con los subíndices como consecuencia de la conservación de la carga. En la reacción indicada se cumple para los superíndices que $14 + 4 = 17 + 1$. De igual forma, los subíndices cumplen que $7 + 2 = 8 + 1$.

Una de las aplicaciones de las reacciones nucleares es la obtención de isótopos radiactivos utilizados en medicina para el tratamiento de los tumores cancerosos o como procedimiento diagnóstico de algunas enfermedades.

Las reacciones nucleares permiten la creación de nuevos elementos. Por ejemplo, el tecnecio ${}^{97}_{43}\text{Tc}$ es un elemento que no se encuentra de forma natural en la Tierra. Se puede obtener por medio de la reacción nuclear ${}^{96}_{42}\text{Mo}({}^2_1\text{H}, n){}^{97}_{43}\text{Tc}$.

Recuerda



Las partículas que aparecen con más frecuencia en las relaciones nucleares son estas:

- Partícula α : ${}^4_2\text{He}$
- Partícula β (electrón): ${}^0_{-1}\text{e}$
- Protón p: ${}^1_1\text{H}$
- Deuterio: ${}^2_1\text{H}$
- Tritio: ${}^3_1\text{H}$
- Neutrón: ${}^1_0\text{n}$
- Fotón: γ
- Positrón: ${}^0_1\text{e}$
- Neutrino: ${}^0_0\nu$

**Observa**

Como $1 \text{ u} = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, la energía equivalente a esa masa se calcula como

$$E = mc^2$$

$$E = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 1,49 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

Teniendo en cuenta que $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$, el contenido energético de 1 u expresado en MeV es

$$1,49 \cdot 10^{-10} \text{ J} \cdot \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J/MeV}} = 931 \text{ MeV}$$

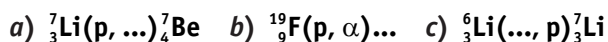
La masa correspondiente a esa energía viene dada por $931 \text{ MeV}/c^2$. Por tanto, $1 \text{ u} = 931 \text{ MeV}/c^2$.

**Observa**

Para que se produzca una reacción de fusión es necesario que los núcleos tengan una energía cinética muy grande para vencer la repulsión electrostática de los protones. Como la velocidad de las núcleos es proporcional a la temperatura, esta ha de ser muy elevada, del orden de millones de grados.

**EJEMPLO 6**

Completa las siguientes reacciones nucleares:



Solución

- a) Como el número de nucleones se conserva, la suma de los superíndices ha de ser igual en los reactivos que en los productos. Por tanto, $7 + 1 = x + 7$. Despejando x , resulta $x = 8 - 7 = 1$. Si aplicamos la conservación de la carga, la suma de los subíndices de los reactivos coincidirá con la de los productos, es decir, $3 + 1 = x + 4$. Por tanto, $x = 4 - 4 = 0$. La partícula que falta es ${}^1_0\text{n}$.
- b) Procediendo igual que en el ejemplo anterior, tendremos que los superíndices han de cumplir que $19 + 1 = 4 + x$. Por tanto, $x = 20 - 4 = 16$. Para los subíndices se puede escribir que $9 + 1 = 2 + x$. El valor de x será $x = 10 - 2 = 8$. El núcleo correspondiente será ${}^{16}_8\text{O}$.
- c) Para los superíndices se tiene que $6 + x = 1 + 7$. Despejando x , resulta $x = 8 - 6 = 2$. Los subíndices cumplirán que $3 + x = 1 + 3$. Por tanto, $x = 4 - 3 = 1$. La partícula que tiene esas características es el deuterio, ${}^2_1\text{H}$.

**EJEMPLO 7**

Calcula la energía cinética mínima de las partículas α para que se produzca la reacción ${}^{24}_{12}\text{Mg}(\alpha, \text{p}){}^{27}_{13}\text{Al}$.

Masa (${}^{24}_{12}\text{Mg}$) = 23,985045 u; masa (${}^4_2\text{He}$) = 4,002603 u; masa (${}^1_1\text{H}$) = 1,007825 u; masa (${}^{27}_{13}\text{Al}$) = 26,981541 u, $1 \text{ u} = 931 \text{ MeV}$.

Solución

La masa de los reactivos es $23,985045 \text{ u} + 4,002603 \text{ u} = 27,987648 \text{ u}$, y la de los productos, $1,007825 \text{ u} + 26,981541 \text{ u} = 27,989366 \text{ u}$. Los resultados anteriores indican que la masa de los productos es mayor que la de los reactivos. Como la energía se ha de conservar, la energía cinética de las partículas α ha de ser tal que, sumada al equivalente en energía de los reactivos, iguale al equivalente en energía de los productos.

La diferencia de masa entre los productos y los reactivos es

$$\Delta m = 27,989366 \text{ u} - 27,987648 \text{ u} = 0,001718 \text{ u}$$

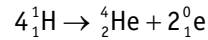
El equivalente en energía de esta masa es $0,001718 \text{ u} \cdot 931 \text{ MeV/u} = 1,6 \text{ MeV}$. Por tanto, la energía cinética mínima de las partículas α es 1,6 MeV.

A. Reacciones de fusión y de fisión

En la Fig. 12.1 se observa que los núcleos más estables son los que corresponden a un número másico intermedio comprendido entre 50 y 100. Un ejemplo puede ser el hierro. A la izquierda de estos núcleos se encuentran otros menos estables, porque su energía de enlace por nucleón es menor. Si los núcleos ligeros, es decir, los que tienen un número másico pequeño (como el hidrógeno o el helio) se combinan y forman núcleos cuya energía de enlace por nucleón es mayor, se desprenderá energía en el proceso y, en consecuencia, se formarán núcleos más estables. Este tipo de reacción se llama *fusión*.

La **fusión** es un tipo de reacción nuclear en la que los núcleos ligeros se combinan para formar otros más pesados.

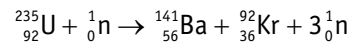
La energía producida en las estrellas tiene su origen en la reacción de fusión del hidrógeno:



Los núcleos, como el uranio y el plutonio, situados a la derecha de los más estables (Fig. 12.1), pueden transformarse en núcleos menos pesados y más estables. En este proceso se libera energía, dado que la energía por nucleón de los núcleos intermedios es menor. Este proceso se conoce como *fisión nuclear*.

La **fisión** es la reacción nuclear en la que los núcleos pesados se dividen dando lugar a otros más ligeros.

La fisión nuclear se produce cuando se bombardean núcleos pesados con neutrones. Siempre se forman dos núcleos intermedios y dos o tres neutrones. Por ejemplo, el uranio se puede fisionar de acuerdo con la reacción



aunque los núcleos intermedios pueden ser otros.

Los neutrones producidos en la fisión reaccionan con otros núcleos de uranio de forma que el número de neutrones aumenta de forma exponencial y tiene lugar una **reacción en cadena** (Fig. 12.8). La energía liberada en la reacción también aumenta de forma descontrolada. Las bombas nucleares se basan en este hecho. Si el número de neutrones se controla utilizando una sustancia llamada **moderador**, que los absorbe, la energía producida se mantiene constante. Los reactores nucleares funcionan de esa manera.

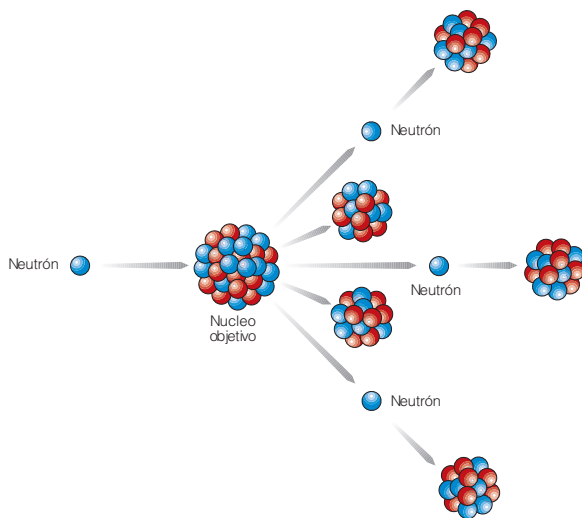


Fig. 12.8. En la fisión nuclear se producen neutrones que bombardean otros núcleos.

Las reacciones de fusión y fisión se relacionan de una forma directa con la curva de enlace por nucleón que vimos en el Apartado 12.1.B. Energéticamente el proceso de fisión nuclear se puede explicar porque los núcleos obtenidos son más estables que el núcleo inicial por tener mayor energía de enlace por nucleón (Fig. 12.8).

Igualmente podemos explicar el proceso de la fusión, donde el núcleo obtenido es más estable que los iniciales por tener mayor energía de enlace por nucleón (Fig. 12.9).

Errores típicos



Cuando resuelvas problemas, fíjate en que la energía liberada por gramo de materia es mucho mayor en las reacciones que en las de fisión.

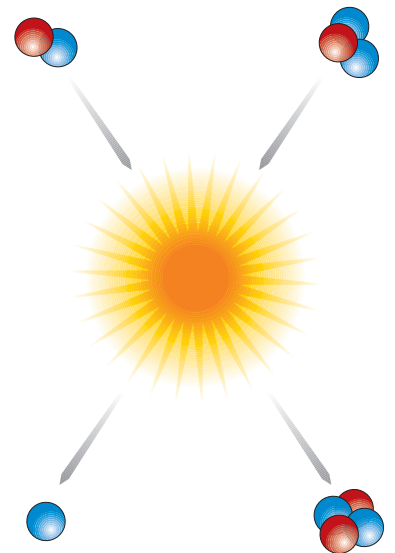


Fig. 12.9.



PRUEBA 1

Considerar una muestra de 80 g de ^{60}Co , que tiene una constante de desintegración de $2 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. Datos: $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$, $m_{\text{Co}} = 59,93 \text{ u}$.

- Determinar el período de semidesintegración de este núcleo.
- Determinar el tiempo que ha de transcurrir para que esta muestra quede reducida a 60 g.
- Determinar la actividad inicial de la muestra.

Islas Baleares

TEN CUIDADO

El problema se podría resolver más fácilmente utilizando la ley de la desintegración radiactiva de la masa:

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

pero hay que utilizar todos los datos, entre ellos el N_A .

RECUERDA

La unidad de la constante de desintegración es s^{-1} y la del período de semidesintegración, s.

Antes de responder

1. Lee atentamente y fíjate

Se tiene una muestra de una sustancia radiactiva y se ha de calcular su período de semidesintegración, el tiempo que tarda en desintegrarse hasta quedar reducida a una cantidad y su actividad en el momento inicial.

2. Recuerda

La relación entre el período de semidesintegración y la constante de desintegración. El concepto de número de Avogadro y el procedimiento para calcular el número de átomos que existen en una cantidad de sustancia. La ley de la desintegración radiactiva y la definición de actividad.

3. ¿Cómo responder a la pregunta?

Calcula el período de semidesintegración aplicando la expresión que lo relaciona con la constante de desintegración. Para aplicar la ley de desintegración es necesario conocer previamente el número de núcleos que existen en la muestra inicial. A continuación, utiliza la ley de desintegración radiactiva y se despeja el tiempo. La actividad calculamos sustituyendo los datos en la expresión correspondiente.

Respuesta

- a) La constante de desintegración o constante radiactiva λ es, en este caso, $2 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$. La relación entre el período de semidesintegración $T_{1/2}$ y dicha constante viene dada por

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

$$\text{Si se sustituye el valor de } \lambda, \text{ se obtiene } T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{\ln 2}{2 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}} = 3,47 \cdot 10^5 \text{ s}$$

- b) En la expresión de la ley de desintegración radiactiva, $N = N_0 e^{-\lambda t}$, N y N_0 son el número final e inicial de núcleos de la muestra radiactiva. Por tanto, hemos de calcular previamente cuántos núcleos existen en 80 g de ^{60}Co .

El número de moles n de una masa m de un elemento cuyo mol es M , se calcula utilizando la expresión $n = \frac{m}{M}$. En este caso, tendremos que

$$n = \frac{m}{M} = \frac{80 \text{ g}}{59,93 \text{ g/mol}} = 1,33 \text{ mol}$$

Como el número de Avogadro indica el número de átomos que hay en un mol, se tendrá

$$1,33 \text{ mol} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \text{ átomos/mol} = 8,01 \cdot 10^{23} \text{ átomos}$$

El número de núcleos será el mismo, es decir, $N_0 = 8,01 \cdot 10^{23}$ núcleos.

Si se repite el procedimiento con la masa final, se obtiene que el número de moles es:

$$n = \frac{m}{M} = \frac{60 \text{ g}}{59,93 \text{ g/mol}} = 1,00 \text{ mol}$$

y el número de átomos o de núcleos (N):

$$1,00 \text{ mol} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \text{ átomos/mol} = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ átomos}$$

Para despejar en la expresión de la ley de desintegración, $N = N_0 e^{-\lambda t}$

Se toman logaritmos neperianos en los dos miembros de la igualdad:

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

Desarrollando el segundo miembro, tendremos

$$\ln N = \ln N_0 + (-\lambda t) \cdot \ln e$$

Por tanto, $\ln N = \ln N_0 - \lambda t$. Despejando t , resulta $t = \frac{\ln N_0 - \ln N}{\lambda}$. Sustituyendo los valores, resulta

$$t = \frac{\ln(8,01 \cdot 10^{23}) - \ln(6,023 \cdot 10^{23})}{-2 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}} = 1,43 \cdot 10^5 \text{ s}$$

RECUERDA

$$\ln(a \cdot b) = \ln a + \ln b$$

$$\ln e^a = a \cdot \ln e = a \cdot 1 = a$$

c) La actividad inicial viene dada por $A = \lambda N_0$, siendo N_0 el número inicial de núcleos. Por tanto:

$$A = \lambda N_0 = 2 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1} \cdot 8,01 \cdot 10^{23} = 1,60 \cdot 10^{18} \text{ desintegraciones/s} = 1,60 \cdot 10^{18} \text{ Bq}$$

RECUERDA

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ desintegración/s}$$

SIGUE PRACTICANDO

1> Se tiene un mol de un isótopo radiactivo, cuyo período de semidesintegración es de 100 días. Conteste razonadamente a las siguientes preguntas:

a) ¿Al cabo de cuánto tiempo quedará sólo el 10 % del material inicial?

b) ¿Qué velocidad de desintegración o actividad tiene la muestra en ese momento? Dar el resultado en unidades del SI.

Dato: Número de Avogadro $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ átomos/mol.

Castilla y León



PRUEBA 2

Sabiendo que el oxígeno 16 tiene 8 protones en su núcleo y su masa atómica es 15,9949 u, calcula:

- Su defecto de masa.
- La energía de enlace en julios.
- La energía de enlace por nucleón también en julios.

Datos: masa del protón: 1,0073 u; masa del neutrón: 1,0087 u;
 $1 \text{ u} = 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Principado de Asturias

■ Antes de responder

1. Lee atentamente y fíjate

Inicialmente se tienen los protones y los neutrones que forman el núcleo de un átomo de oxígeno. Cuando se unen para formar dicho núcleo se produce un defecto de masa que se pide calcular. También se ha de obtener el valor de la energía de enlace total y de enlace por nucleón.

2. Recuerda

- El concepto de defecto de masa.
- Los conceptos de energía de enlace y de energía de enlace por nucleón.
- La expresión que permite calcular el equivalente en energía de una masa determinada.

3. ¿Cómo responder a la pregunta?

Calcula la masa inicial de los nucleones antes de ligarse para formar el núcleo. El defecto de masa es la diferencia entre la inicial y la que tiene el núcleo formado.

Para calcular la energía de enlace obtén el equivalente en energía del defecto de masa.

La energía de enlace por nucleón es el cociente de la energía de enlace y el número total de nucleones que forman parte del núcleo.

■ Respuesta

a) La masa de los 8 protones y de los 8 neutrones que forman el núcleo del isótopo $^{16}_8\text{O}$ es

$$m_i = 8m_p + 8m_n = 8 \cdot 1,0073 \text{ u} + 8 \cdot 1,0087 \text{ u} = 16,1280 \text{ u}$$

Convertimos esa masa en kilogramos:

$$m_i = 16,1280 \text{ u} \cdot 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg/u} = 2,6782 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$$

RECUERDA

Cuando se calcula el defecto de masa, se ha de utilizar el mismo número de decimales que tienen los datos.

La masa de un núcleo de ${}^{16}_8\text{O}$ es 15,9949 u. Expresada en kilogramos, resulta

$$m_f = 15,9949 \text{ u} \cdot 1,6606 \cdot 10^{-27} \text{ kg/u} = 2,6561 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$$

Se observa que la masa de los nucleones libres es mayor que la del núcleo.

El defecto de masa Δm es la diferencia entre la masa inicial y la final:

$$\Delta m = m_i - m_f = 2,6782 \cdot 10^{-26} \text{ kg} - 2,6561 \cdot 10^{-26} \text{ kg} = 2,21 \cdot 10^{-28} \text{ kg}$$

- b) La masa que desaparece al formarse el núcleo se ha convertido en una cantidad de energía que se llama *energía de enlace*. Dicha energía es la que mantiene ligados a los nucleones y la que habría que suministrar al núcleo para obtener los nucleones libres. Por tanto, la energía de enlace es el equivalente en energía del defecto de masa.

Se obtiene utilizando la expresión $E = \Delta m c^2$.

En este caso, la energía de enlace E_{enl} será

$$E_{\text{enl}} = 2,21 \cdot 10^{-28} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 1,989 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

- c) El núcleo del isótopo ${}^{16}_8\text{O}$ está formado por 8 protones y 8 neutrones. El número de nucleones es, por tanto, la suma de las partículas anteriores: 16.

La energía por nucleón se obtiene dividiendo la energía de enlace por el número total de nucleones; es decir,

$$E_{\text{e, nucleón}} = \frac{E_{\text{enl}}}{\text{Número de nucleones}} = \frac{1,989 \cdot 10^{-11} \text{ J}}{16} = 1,2431 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

TEN CUIDADO

El valor del defecto de masa puede expresarse en kg o en función de u, pero fíjate en que el enunciado da el valor de u en kg.

SIGUE PRACTICANDO

- 2> a) Explique qué es el defecto de masa y calcule su valor para el isótopo ${}^{15}_7\text{N}$.
b) Calcule su energía de enlace por nucleón.

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}; m_p = 1,007276 \text{ u}; m_n = 1,008665 \text{ u}; m({}^{15}_7\text{N}) = 15,0001089 \text{ u}; 1 \text{ u} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

Andalucía

- 3> Considera los núcleos de carbono ${}^{12}\text{C}$ y ${}^{13}\text{C}$ de masas 12,0000 uma y 13,0034 uma, respectivamente, siendo 6 el número atómico de estos dos isótopos. Calcula para ambos núcleos:

- a) El defecto de masa en kilogramos y en unidades de masa atómica.
b) La energía de enlace.
c) La energía de enlace por nucleón.

$$\text{Datos: } 1 \text{ uma} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}; 1 \text{ uma} = 931 \text{ MeV}; 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}; m(p) = 1,0073 \text{ uma}; m(n) = 1,0087 \text{ uma}; c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s.}$$

Canarias

- 4> 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.

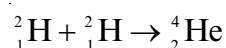
Andalucía



PRUEBA 3

a) En la reacción del ${}^6_3\text{Li}$ con un neutrón se obtiene un núclido X y una partícula alfa. Escriba la reacción nuclear y determine las características del núclido X resultante.

b) Calcule la energía liberada en la reacción de fusión:



$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$; $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $m({}^4_2\text{He}) = 4,0026 \text{ u}$; $m({}^2_1\text{H}) = 2,0141 \text{ u}$

Andalucía

■ Antes de responder

1. Lee atentamente y fíjate

Se pide completar una reacción nuclear y la energía que se produce en una reacción de fusión.

2. Recuerda

- Las magnitudes que se conservan en una reacción nuclear.
- El concepto de *defecto de masa*.
- La ley que permite calcular el equivalente en energía de una masa determinada.

3. ¿Cómo responder a la pregunta?

Aplica la conservación del número másico y de la carga eléctrica para deducir las características del núclido formado.

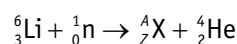
Calcula el defecto de masa en la reacción de fusión y halla su equivalente en energía.

RECUERDA

El número atómico Z representa la carga eléctrica del núcleo y el número másico A , el número de nucleones..

■ Respuesta

a) Recordando que una partícula alfa es un núcleo de ${}^4_2\text{He}$ y que un neutrón se representa por ${}^1_0\text{n}$, la reacción se puede escribir como



donde X es el núclido desconocido, A es su número másico, y Z, su número atómico.

Si la carga se conserva en la reacción, la suma de los subíndices de los reactivos ha de ser igual que la de los productos. Por tanto,

$$3 + 0 = Z + 2$$

Si se despeja Z, se obtiene $Z = 3 + 0 - 2 = 1$

Como el número de nucleones se mantiene constante en las reacciones nucleares, la suma de los superíndices de los reactivos y de los productos ha de ser igual. Eso implica que

$$6 + 1 = A + 4$$

El valor de A será $A = 6 + 1 - 4 = 3$.

El núclido que tiene un número másico de 3 y un número atómico igual a 1 se representa por ${}^3_1\text{H}$ y corresponde al tritio.

b) Para calcular la energía desprendida en la reacción hemos de obtener el defecto de masa que se produce.

La masa de los reactivos es $2,0141 \text{ u} + 2,0141 \text{ u} = 4,0282 \text{ u}$.

La masa del producto es $4,0026 \text{ u}$.

Los resultados anteriores confirman que se ha producido un defecto de masa. La disminución producida en la masa tiene este valor:

$$\Delta m = 4,0282 \text{ u} - 4,0026 \text{ u} = 0,0256 \text{ u}$$

El defecto de masa está expresado en unidades de masa atómica. Lo convertimos en kilogramos:

$$0,0256 \text{ u} \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg/u} = 4,25 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$$

Para calcular la energía equivalente de esa masa, utilizaremos la expresión de Einstein:

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

Sustituyendo los datos, se obtiene la energía liberada, que será

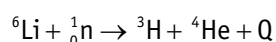
$$E = \Delta m c^2 = 4,25 \cdot 10^{-29} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 = 3,83 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

RECUERDA

Los elementos se caracterizan por su número atómico. Si el número atómico de un elemento desconocido es 1, se trata del hidrógeno o de uno de sus isótopos, independientemente del valor que tenga el número másico.

SIGUE PRACTICANDO

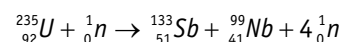
5> Calcula la energía Q , medida en MeV, desprendida en la siguiente reacción nuclear:



Masas nucleares: ${}^6\text{Li} = 6,015125 \text{ u}$; ${}^3\text{H} = 3,016050 \text{ u}$; ${}^4\text{He} = 4,002603 \text{ u}$; ${}^1_0\text{n} = 1,008665 \text{ u}$
($c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}$, $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, $1 \text{ MeV} = 1,60 \cdot 10^{-13} \text{ J}$)

Castilla-La Mancha

6> Considere la reacción nuclear:



a) Explique de qué tipo de reacción se trata y determine la energía liberada por átomo de Uranio.

b) ¿Qué cantidad de ${}^{235}_{92}\text{U}$ se necesita para producir 10^6 kWh ?

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$; $m_{\text{U}} = 235,128 \text{ u}$;
 $m_{\text{Sb}} = 132,942 \text{ u}$; $m_{\text{Nb}} = 98,932 \text{ u}$; $m_{\text{n}} = 1,0086 \text{ u}$;
 $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$



Actividades propuestas

- 1>** Diga si la siguiente frase es CIERTA o FALSA y razone la respuesta: «Las partículas beta son fotones de radiación».
- 2>** Teniendo en cuenta que en los núcleos más estables de los elementos ligeros del sistema periódico, el número de protones coincide con el de neutrones, ¿qué tipo de emisión, β^- o β^+ experimentará el $^{14}_6\text{C}$ para cumplir dicha condición de estabilidad? Escribe la ecuación de desintegración correspondiente.
- 3>** Justifique que, según la ley de desintegración radiactiva, el siguiente enunciado no puede ser correcto: «Una muestra contenía hace 1 día el doble de núcleos que en el instante actual, y hace 2 días el triple que en el instante actual».
- 4>** En los restos orgánicos recientes la concentración de $^{14}_6\text{C}$ es mayor que en los antiguos. ¿A qué se debe esta diferencia de concentración y qué información podemos obtener de ella?
- 5>** Calcula el periodo de semidesintegración de un núcleo radioactivo cuya actividad disminuye a la cuarta parte al cabo de 48 horas.
- 6>** El periodo de semidesintegración del cobalto-60 es 5,27 años. ¿Cuántos gramos de cobalto habrá dentro de diez años de una muestra que tiene actualmente dos gramos de dicho elemento?
- 7>** El Tecnecio-99 es un isótopo radiactivo que se desintegra emitiendo rayos gamma y tiene un periodo de semidesintegración de 6 horas. Si se tiene una muestra de 10 g, ¿qué cantidad de ^{99}Tc quedará al cabo de un día?
- 8>** Se han encontrado unos restos arqueológicos de edad desconocida. Entre ellos apareció una muestra de carbono que contenía una octava parte del isótopo del carbono $^{14}_6\text{C}$ que se encuentra en la materia viva (solo queda 1/8 del $^{14}_6\text{C}$ original). Teniendo en cuenta que el periodo de semidesintegración del $^{14}_6\text{C}$ es de 5 730 años,
- Hallar la edad de dichos restos.
 - Si en la actualidad en la muestra tenemos 10^{12} átomos de $^{14}_6\text{C}$, ¿cuál será la actividad de la muestra?
- 9>**
- Dibuje de forma aproximada la gráfica que representa la energía de enlace por nucleón en función del número másico e indique qué puede deducirse de ella en relación con la estabilidad de los núcleos.
 - Razone, a partir de la gráfica, cuál de los dos procesos, la fusión o la fisión nucleares, proporciona mayor energía por nucleón.
- 10>** Determine la energía de enlace del núcleo $^{14}_6\text{C}$, cuya masa atómica es 14,003242 u.
Datos: 1 u = 931.50 MeV/c², masa del protón 1,007276 u y masa del neutrón 1,008665 u.
- 11>**
- Calcule el defecto de masa de los núclidos $^{11}_5\text{B}$ y $^{222}_{86}\text{Rn}$ y razone cuál de ellos es más estable.
 - En la desintegración del núcleo $^{222}_{86}\text{Rn}$ se emiten dos partículas alfa y una beta, obteniéndose un nuevo núcleo. Indique las características del núcleo resultante.
 $m_{\text{B}} = 11,009305 \text{ u}$; $m_{\text{Rn}} = 222,017574 \text{ u}$;
 $m_{\text{p}} = 1,007825 \text{ u}$; $m_{\text{n}} = 1,008665 \text{ u}$
- 12>** ¿Cuál de estas reacciones nucleares es posible?
- $^2_1\text{H} + ^3_1\text{H} \rightarrow ^4_2\text{He}$
 - $^{14}_7\text{N} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1\text{H}$
 - $^{235}_{92}\text{U} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^{141}_{56}\text{Ba} + ^{92}_{36}\text{Kr} + 2^1_0\text{n}$
- 13>** Complete las siguientes reacciones nucleares:
- $$^{23}_{11}\text{Na} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^{24}_{11}\text{Na} + \dots$$
- $$^{27}_{13}\text{Al} + ^4_2\text{He} \rightarrow ^{30}_{15}\text{P} + \dots$$
- $$^{30}_{15}\text{P} \rightarrow ^{30}_{14}\text{Si} + \dots$$
- $$^9_4\text{Be} + \dots \rightarrow ^{12}_6\text{C} + ^1_0\text{n}$$
- 14>** En la siguiente reacción nuclear:
- $$^9_4\text{Be} \rightarrow ^8_3\text{Be} + ^4_2\text{X}$$
- la partícula X es...
- un protón.
 - un neutrón.
 - un electrón.
- 15>**
- ¿Cómo se puede explicar que un núcleo emita partículas β si en él solo existen neutrones y protones?

Actividades propuestas

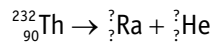


b) El ^{232}Th se desintegra, emitiendo 6 partículas α y 4 partículas β , dando lugar a un isótopo estable del plomo. Determine el número másico y el número atómico de dicho isótopo.

16> Un núcleo de Torio-232 se desintegra, transformándose en un núcleo de Radio y emitiendo una partícula α .

PAU

a) Completa la ecuación de desintegración correspondiente a este proceso.



b) Calcula la energía cinética, expresada en J y en eV, que se libera en esta desintegración.

Datos: las masas atómicas de estos isótopos de Th y Ra y de la partícula α son, respectivamente, 232,038124 u, 228,031139 u y 4,002603 u, 1 u = $1,66 \cdot 10^{-27}$ kg; $c = 3,00 \cdot 10^8$ m/s; $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ C

17> a) Explica brevemente la fusión y la fisión nuclear y en qué se utilizan dichos procesos.

PAU

b) ¿Cuál de los procesos anteriores utiliza el Sol?

c) El Sol radia unos 10^{34} J/año. ¿Cuánto varía la masa del Sol cada año?

Dato: $c = 3 \cdot 10^8$ m · s⁻¹.

18> Entre los materiales gaseosos que pueden escapar de un reactor nuclear, se encuentra el $^{131}_{53}\text{I}$, que es muy peligroso por la facilidad con que se fija el yodo en la glándula tiroides.

PAU

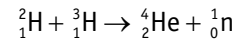
a) Escribe la reacción de desintegración sabiendo que se trata de un emisor β^- .

b) Calcula, en unidades del SI, la energía total liberada por el nucleido al desintegrarse.

Datos: masa (^{131}I) = 130,90612 uma; masa (^{131}Xe) = 130,90508 uma, masa(β^-) = $5,4891 \cdot 10^{-4}$ uma; 1 uma = $1,6605 \cdot 10^{-27}$ kg; $c = 3 \cdot 10^8$ m · s⁻¹.

19> En la explosión de una bomba de hidrógeno se produce la reacción

PAU



Calcule:

a) El defecto de masa del ^4_2He .

b) La energía liberada en la formación de 10 g de helio.

$m(^2_1\text{H}) = 2,01474$ u; $m(^3_1\text{H}) = 3,01700$ u; $m(^4_2\text{He}) = 4,00388$ u; $m(^1_0\text{n}) = 1,0087$ u
1 u = $1,66 \cdot 10^{-27}$ kg; $c = 3 \cdot 10^8$ m · s⁻¹

Soluciones

1> falsa: $2 > ^6_{14}\text{C} \rightarrow ^{14}_6\text{X} + ^0_{-1}\text{e}^-$; $5 > T^{1/2} = 24$ horas; $6 > m = 0,53$ g; $7 > m = 0,625$ g; $8 > (a) t = 5,4 \cdot 10^{12}$ s, $(b) A = 0,39$ Bq; $10 > E = 102,21$ MeV; $11 > (a) \Delta m^{131}_{53} = 0,000743$ u, $\Delta m^{232}_{90} = 1,008339$ u, $(b) A = 214$, $Z = 83$;

12 > b y c; 14 > (a); 15 > A = 208, Z = 82; 16 > (a) $^{232}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{228}_{88}\text{Ra} + ^4_2\text{He}$, $^{228}_{88}\text{Ra} \rightarrow ^{226}_{86}\text{Rn} + ^2_0\text{e}^-$, $^{226}_{86}\text{Rn} \rightarrow ^{222}_{84}\text{Po} + ^4_2\text{He}$, $^{222}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{218}_{82}\text{Pb} + ^4_2\text{He}$, $^{218}_{82}\text{Pb} \rightarrow ^{214}_{80}\text{Po} + ^4_2\text{He}$, $^{214}_{80}\text{Po} \rightarrow ^{210}_{82}\text{Pb} + ^4_2\text{He}$, $^{210}_{82}\text{Pb} \rightarrow ^{206}_{82}\text{Pb} + ^4_2\text{He}$; 17 > (a) $m = 1,11 \cdot 10^{17}$ kg; 18 > $I^{55}_{131} \rightarrow I^{55}_{131} + ^0_{-1}\text{e}^-$, $E = 4,09 \cdot 10^6$ eV; 19 > (a) $E = 7,33 \cdot 10^{-14}$ J; 19 > (a) $\Delta m^{232}_{90} = 0,025604$ u, $(b) E = 4,32 \cdot 10^{12}$ J



Resumen

Energía de enlace		$E = \Delta m c^2$	
Leyes de Soddy	Desintegración alfa ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \text{He}$	<p>Fig. 12.10.</p>	
	Desintegración beta ${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z+1} Y + {}^0_{-1} e$	<p>Fig. 12.11.</p>	<p>Fig. 12.12.</p>
	Desintegración gamma ${}^A_Z X^* \rightarrow {}^A_Z X + \gamma$	<p>Fig. 12.13.</p>	
Ley de la desintegración radiactiva	$N = N_0 e^{-\lambda t}$	<p>Fig. 12.14.</p>	
Periodo de semidesintegración		$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$	
Actividad (velocidad de desintegración)		$A = \lambda N$	
Energía desprendida en una reacción nuclear		$E = \Delta m c^2$	



Técnico en medicina nuclear

Para trabajar como técnico en medicina nuclear es necesario tener una titulación de ingeniero o de físico especializado en dicha rama de la física. Los isótopos radiactivos son utilizados por los médicos como elementos trazadores en el diagnóstico de enfermedades. Los radioisótopos, administrados en cantidades muy pequeñas, se fijan en los órganos del cuerpo del paciente y emiten radiaciones. De esta forma se obtienen las tomografías por emisión de positrones o las gammagra-

fías de diversos órganos (renales, tiroideas, óseas, etc.). Los técnicos en medicina nuclear se encargan del mantenimiento de los detectores de las radiaciones emitidas por los isótopos radiactivos y de la supervisión de las medidas de seguridad. La radiación producida por algunos radioisótopos también es utilizada con fines terapéuticos. La destrucción de las células cancerosas se realiza por medio de la radiación gamma emitida en la desintegración de los núcleos de cobalto-60.