# 1 Fenómenos radiactivos

## Página 329

**1** **¿Cuál de las emisiones radiactivas se parece a los rayos X? ¿Qué tienen en común? ¿En qué se diferencian?**

Los rayos gamma se parecen a los rayos X, pero los rayos alfa y beta no. Ambos, rayos gamma y rayos X, son radiación electromagnética de alta energía (fotones, sin masa) muy penetrante. Solo se diferencian en la longitud de onda que es más corta en los rayos gamma; por tanto, los rayos gamma tienen una frecuencia superior y son más energéticos.

**2** **Calcula el radio de curvatura de la trayectoria de rayos alfa de 6,5 MeV de energía que se mueven en un campo magnético transversal de 1 T.**

La energía de los rayos alfa es energía cinética a partir de la cual se obtiene el momento lineal:

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad \rightarrow \quad p = m \cdot v = \sqrt{2 \cdot m \cdot E_c} =$$

$$= \sqrt{2 \cdot \left(4{,}0015 \text{ u} \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27} \ \frac{\text{kg}}{\text{u}}\right) \cdot \left(6{,}5 \text{ MeV} \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-13} \ \frac{\text{J}}{\text{MeV}}\right)} =$$

$$= 1{,}176 \cdot 10^{-19} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

donde se supone que no es necesario emplear expresiones relativistas. Ahora, por aplicación de la fuerza de Lorentz (ver unidad 3) se llega a la expresión:

$$r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B} = \frac{1{,}176 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{(2 \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19} \text{ C}) \cdot 1 \text{ T}} = 0{,}367 \text{ m}$$

**3** **Rayos $\alpha$ y $\beta$ de igual velocidad penetran en un campo magnético perpendicular, desviándose en sentidos opuestos. ¿Lo harán de forma simétrica? ¿Por qué?**

No, las trayectorias no son simétricas porque las masas son muy diferentes. El radio de curvatura de los rayos $\alpha$ es mucho mayor que el de los rayos $\beta$.

**4** **De los siguientes elementos químicos, ¿cuáles fueron descubiertos por M. Curie? Radio, uranio, radón, polonio, torio y plutonio.**

Los elementos químicos que descubrieron Pierre y Marie Curie fueron el polonio y el radio.

# 2 El núcleo atómico

## Página 331

**5** **Indica el número de protones, neutrones y nucleones de cada uno de los siguientes nucleidos:**

$$^{235}_{92}\text{U} \quad ; \quad ^{210}_{82}\text{Pb} \quad ; \quad ^{214}_{84}\text{Po} \quad ; \quad ^{140}_{54}\text{Xe}$$

Para cada uno de los nucleidos propuestos, tenemos:

$^{235}_{92}\text{U}$: $Z$ = 92 protones; $N$ = 143 neutrones; $A$ = 235 nucleones.

$^{210}_{82}\text{Pb}$: $Z$ = 82 protones; $N$ = 128 neutrones; $A$ = 210 nucleones.

$^{214}_{84}\text{Po}$: $Z$ = 84 protones; $N$ = 130 neutrones; $A$ = 214 nucleones.

$^{140}_{54}\text{Xe}$: $Z$ = 54 protones; $N$ = 86 neutrones; $A$ = 140 nucleones.

**6 El radio del núcleo del isótopo C-12 es, aproximadamente, $2,7 \cdot 10^{-15}$ m. Calcula la densidad del núcleo. Expresa el resultado en unidades del SI.**

Para hallar la densidad del núcleo, debemos conocer, en primer lugar, su masa. Como sabemos que la masa atómica del carbono-12 es 12 u, la masa del núcleo será:

$$m_{nuclear} = m - 6 \cdot m_e = 12 \text{ u} - 6 \cdot 5,486 \cdot 10^{-4} \text{ u} = 11,9967 \text{ u}$$

Expresada en kilogramos, la masa del núcleo es:

$$m_{nuclear} = 11,9967 \text{ u} \cdot 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg/u} = 1,9921 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$$

Por otra parte, el volumen del núcleo es:

$$V = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r^3 = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (2,7 \cdot 10^{-15} \text{ m})^3 = 8,2448 \cdot 10^{-44} \text{ m}^3$$

Por tanto, la densidad del núcleo del átomo C-12 vale:

$$d = \frac{m}{V} = \frac{1,9921 \cdot 10^{-26} \text{ kg}}{8,2448 \cdot 10^{-44} \text{ m}^3} = 2,42 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

**7 El magnesio, Mg, se encuentra en la naturaleza como mezcla de tres isótopos, Mg-24, Mg-25 y Mg-26. Sabiendo que sus masas atómicas, en u, son 23,985, 24,986 y 25,983, respectivamente, y sus abundancias relativas valen 78,8 %, 10,1 % y 11,1 %, respectivamente, calcula la masa atómica promedio del magnesio.**

Calculamos la masa atómica promedio del magnesio natural teniendo en cuenta la abundancia de cada uno de sus isótopos; así se obtiene:

$$M = 23,985 \text{ u} \cdot 0,788 + 24,986 \text{ u} \cdot 0,101 + 25,983 \text{ u} \cdot 0,111 = 24,308 \text{ u}$$

# 3 Emisiones radiactivas y transmutación

**Página 333**

**8 Si en el núcleo no hay electrones, ¿cómo se explica que en la desintegración beta salgan expulsados electrones?**

Dentro del núcleo no hay electrones. Los rayos beta se generan por la desintegración de neutrones (que se transforman en protones) y son inmediatamente expulsados del núcleo.

**9 Escribe las ecuaciones nucleares de:**

**a) Emisión de rayos alfa por parte de Bi-210 y de Pu-239.**

**b) Emisión beta negativa de Cs-135 y de Ra-225.**

**c) Captura electrónica de K-40 y de Po-209.**

a) ${}^{210}_{83}\text{Bi} \rightarrow {}^{206}_{81}\text{Tl} + {}^{4}_{2}\text{He}$ ; ${}^{239}_{92}\text{Pu} \rightarrow {}^{235}_{90}\text{U} + {}^{4}_{2}\text{He}$

b) ${}^{135}_{55}\text{Cs} \rightarrow {}^{135}_{56}\text{Ba} + {}^{0}_{-1}\beta$ ; ${}^{225}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{225}_{89}\text{Ac} + {}^{0}_{-1}\beta$

c) ${}^{40}_{19}\text{K} + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{40}_{18}\text{Ar}$ ; ${}^{209}_{84}\text{Po} + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{209}_{83}\text{Bi}$

**10 ¿Por qué es habitual que se emitan rayos gamma después de una emisión alfa o beta?**

Después de una emisión alfa o beta, el núcleo resultante queda en un estado energético excitado y la emisión de rayos gamma es un mecanismo muy eficiente de eliminación de energía para decaer al estado fundamental.

**11** **Busca información sobre la tomografía de emisión de positrones (PET) y cita los radionucleidos que suelen emplearse en esta técnica.**

Respuesta abierta.

**12** **Los electrones de la desintegración beta de un mismo tipo de nucleido no tienen siempre igual energía o velocidad; ¿por qué?**

Cuando una muestra que contiene un único radionucleido emite rayos beta, los electrones salen despedidos con un amplio abanico de velocidades (energías). Esto no sucede con la emisión alfa. La razón es que en cada desintegración beta se genera y emite simultáneamente un neutrino. En consecuencia, la energía se reparte entre el electrón y el neutrino.

**13** **Calcula la velocidad en el vacío de rayos gamma de energía $E_1$ = 0,511 MeV y $E_2$ = 1,226 MeV.**

Los rayos gamma son fotones; por tanto se mueven en el vacío con velocidad c, sea cual sea su energía.

# 4 Radiactividad natural y artificial

### Página 335

**14** **Indica cómo puede transformarse el $^{213}_{83}Bi$ en plomo-209 mediante dos desintegraciones sucesivas, una $\alpha$ y otra $\beta$. Señala en qué serie se encuentra.**

La desintegración $\alpha$ produce un nuevo nucleido cuyo número másico es cuatro unidades inferior ($A$ = 213 – 4 = 209) y su número atómico es dos unidades menor ($Z$ = 83 – 2 = 81), por lo que debe tratarse del talio-209.

La siguiente desintegración, de tipo $\beta$, produce un nucleido con el mismo número másico ($A$ = 209) pero con un protón más ($Z$ = 82), que es el plomo-209 mencionado en el enunciado.

Por tanto, las desintegraciones que tienen lugar son:

$$^{213}_{83}\text{Bi} \rightarrow {}^{209}_{81}\text{Tl} + {}^{4}_{2}\text{He}$$

$$^{209}_{81}\text{Tl} \rightarrow {}^{209}_{82}\text{Pb} + {}^{0}_{-1}\beta$$

Como el nucleido inicial cumple la relación:

$$213 = 4 \cdot n + 1$$

con $n$ = 53, este proceso se encuentra en la serie del neptunio.

**15** **El $^{241}_{94}Pu$ experimenta una desintegración $\beta$, dos de tipo $\alpha$ y, finalmente, otra de tipo $\beta$. Escribe las ecuaciones de los distintos procesos e indica la serie en la que se encuentra, así como el nombre del nucleido final. Ayúdate con la tabla periódica si es necesario.**

La desintegración $\beta$ produce un nuevo nucleido con el mismo número másico, pero con un protón más.

La desintegración $\alpha$ produce un nuevo nucleido cuyo número másico es cuatro unidades menor, y cuyo número atómico es dos unidades menor.

Por tanto, las ecuaciones de los procesos descritos por el enunciado son:

$$^{241}_{94}\text{Pu} \rightarrow {}^{241}_{95}\text{Am} + {}^{0}_{-1}\beta$$

$$^{241}_{95}\text{Am} \rightarrow {}^{237}_{93}\text{Np} + {}^{4}_{2}\text{He}$$

$$^{237}_{93}\text{Np} \rightarrow {}^{233}_{91}\text{Pa} + {}^{4}_{2}\text{He}$$

$$^{233}_{91}\text{Pa} \rightarrow {}^{233}_{92}\text{U} + {}^{0}_{-1}\beta$$

Como vemos, el nucleido final es el uranio-233.

Para determinar la serie a la que pertenecen los procesos, nos fijamos en que:

$$241 = 4 \cdot n + 1 \rightarrow n = 60$$

Se trata, por tanto, de la serie del neptunio.

**16** **¿Por qué no se puede saber con seguridad el progenitor de las series del neptunio y del actinio?**

La razón es que ha transcurrido tanto tiempo desde la formación del planeta Tierra que los progenitores se han consumido totalmente y solo quedan los últimos miembros de la serie. Por eso, no es posible afirmar con seguridad con qué radionucleido se inició.

**17** **Calcula el número de emisiones $\alpha$ y $\beta$ que conectan a los miembros de la serie del actinio comenzando con $^{235}U$ y finalizando en $^{207}Pb$.**

Se plantea la ecuación nuclear para el proceso global:

$$^{235}_{92}U \rightarrow x\,^{4}_{2}\alpha + y\,^{0}_{-1}\beta + ^{207}_{82}Pb$$

De donde resulta el sistema de ecuaciones:

$$235 = 4 \cdot x + 0 \cdot y + 207$$

$$92 = 2 \cdot x - y + 82$$

Por tanto, $x = 7$ (7 rayos alfa) e $y = 4$ (4 rayos beta).

**18** **Explica cómo es posible que en la Tierra haya isótopos naturales altamente radiactivos. ¿Por qué no han desaparecido?**

Los isótopos radiactivos naturales de vida corta (altamente radiactivos) deben regenerarse continuamente. Tienen dos procedencias:

a) Familias o series radiactivas. Son miembros intermedios de las familias radiactivas en las cuales se generan continuamente a partir de progenitores de larga vida para, en breve tiempo, desintegrarse. Corresponden a elementos químicos de alto número atómico ($Z > 83$).

b) Procesos atmosféricos. Se generan continuamente en la atmósfera principalmente por la acción de los rayos cósmicos que impactan sobre los átomos de los gases atmosféricos dando lugar a cadenas de procesos nucleares. Estos radionucleidos suelen corresponder a elementos químicos de bajo número atómico, como es el caso del carbono-14.

# 5 Ley de la desintegración radiactiva

### Página 339

**19** **El período de semidesintegración del uranio-235 es de $7 \cdot 10^8$ a. Calcula el tiempo que ha de transcurrir para que una muestra vea reducida su actividad hasta un 25 % de su valor inicial.**

La constante radiactiva del uranio-235 vale:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{\ln 2}{7 \cdot 10^8 \text{ a}} = 9{,}902 \cdot 10^{-10} \text{ a}^{-1}$$

Si la actividad de la muestra se reduce al 25 % del valor inicial, tendremos:

$$A = 0{,}25 \cdot A_0$$

Aplicando la expresión de la ley de la desintegración radiactiva y despejando, el tiempo necesario resulta:

$$A = 0,25 \cdot A_0 = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \rightarrow \quad 0,25 = e^{-\lambda \cdot t} \quad \rightarrow \quad \ln 0,25 = -\lambda \cdot t$$

$$t = -\frac{\ln 0,25}{\lambda} = -\frac{\ln 0,25}{9,902 \cdot 10^{-10}\ \text{a}^{-1}} = 1,4 \cdot 10^{9}\ \text{a}$$

Como vemos, el tiempo que debe transcurrir es de 1400 millones de años, es decir, aproximadamente una décima parte de la edad del universo.

**20 La datación mediante C-14 no se utiliza para restos de más de 50 000 años. Calcula cuánto se reduce la actividad de una muestra de dicho isótopo tras 60 000 años, sabiendo que $t_{1/2}$ = 5 730 a.**

Teniendo en cuenta el período de semidesintegración del carbono-14, calculamos la constante radiactiva de este isótopo:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{\ln 2}{5\,730\ \text{a}} = 1,21 \cdot 10^{-4}\ \text{a}^{-1}$$

La actividad de la muestra al cabo de 60 000 años es:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \rightarrow \quad A = A_0 \cdot e^{-1,21 \cdot 10^{-4} \cdot 60\,000} = 7,03 \cdot 10^{-4} \cdot A_0$$

Es decir, la actividad de la muestra a los 60 000 años es un 0,07 % de su valor inicial.

**21 El período de semidesintegración del plomo-214 es de 27 minutos. Calcula su constante radiactiva, su vida media y la masa que quedará tras un día, en una muestra que inicialmente contenía 45 g.**

La constante radiactiva y la vida media del plomo-214 son, respectivamente:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{\ln 2}{27\ \text{min}} = 0,026\ \text{min}^{-1} \quad \rightarrow \quad \tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0,026} = 38,46\ \text{min}$$

Si la muestra contenía 45 g, la masa de plomo-214 que quedará un día después será:

$$m = m_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \rightarrow \quad m = 45\ \text{g} \cdot e^{-0,026 \cdot 1440} = 2,47 \cdot 10^{-15}\ \text{g}$$

**22 Calcula la cantidad de tritio que quedará en una muestra que inicialmente contenía 10 g tras 48 años. Dato: $t_{1/2}$ = 12 a.**

La constante radiactiva del tritio es:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{\ln 2}{12\ \text{a}} = 0,058\ \text{a}^{-1}$$

Como la masa de una sustancia radiactiva disminuye con el tiempo según la expresión:

$$m = m_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \rightarrow \quad m = 10\ \text{g} \cdot e^{-0,058 \cdot 48} = 0,618\ \text{g}$$

También podemos llegar a este resultado fijándonos en que el tiempo indicado es igual a cuatro veces el período de semidesintegración del tritio (12 · 4 = 48 a). Como en cada tiempo igual al período de semidesintegración la masa de sustancia radiactiva se reduce a la mitad, la masa final será el resultado de dividir por dos la masa inicial cuatro veces:

$$m = \frac{10\ \text{g}}{2^4} = 0,625\ \text{g}$$

NOTA: A partir de la ley de la desintegración radiactiva se puede demostrar que la actividad de una muestra, cuyo período de semidesintegración es $t_{1/2}$ y su actividad inicial es $A_0$, decae con el tiempo según la expresión:

$$A = \frac{A_0}{2^{t/t_{1/2}}}$$

# 6 Efectos de las radiaciones. Riesgos y aplicaciones

### Página 341

**23 ¿Por qué crees que la terapia a la que son sometidos algunos enfermos de cáncer se llama «radioterapia»?**

Porque consiste en exponer los tumores de los enfermos a la acción de radiación (externa o interna) con el fin de destruirlos. Como fuente de radiación se utilizan diversos nucleidos radiactivos, como cobalto-60 o yodo-131.

**24 Infórmate sobre los pararrayos radiactivos, ya en desuso, y su funcionamiento.**

Disponen de un compartimiento en el que se ha introducido una muestra radiactiva con el fin de ionizar el aire de los alrededores para que este atraiga a los rayos. Están en desuso.

**25 Expón la diferencia entre las magnitudes llamadas dosis equivalente y dosis efectiva. ¿Cuál de ellas tiene en cuenta la sensibilidad específica de los tejidos y de los órganos en los que inciden las radiaciones ionizantes?**

Ambas magnitudes se emplean para cuantificar el efecto biológico que produce la radiación ionizante absorbida por un tejido mediante factores de ponderación. La dosis equivalente refleja la efectividad biológica de cada tipo de radiación ionizante, pues a igualdad de energía absorbida no es similar el efecto que producen, por ejemplo, los rayos X y los neutrones.

La dosis efectiva es la magnitud más completa, porque tiene en cuenta también la sensibilidad específica de cada tejido.

# 7 Interacción fuerte y estabilidad nuclear

### Página 345

**26 Las masas atómicas de deuterio, tritio y $^4$He son 2,0141018 u, 3,01604927 u y 4,0026032 u, respectivamente. Calcula la masa nuclear de cada uno de sus nucleidos.**

Para obtener la masa nuclear de cada nucleido, basta con restar a la masa atómica la masa de los electrones del átomo.

Para el deuterio, tenemos:

$$m_{nuclear}\left({}^{2}_{1}\mathrm{H}\right) = m\left({}^{2}_{1}\mathrm{H}\right) - m_e =$$
$$= 2{,}0141018 - 5{,}486 \cdot 10^{-4} = 2{,}0135532\ \mathrm{u}$$

Para el tritio:

$$m_{nuclear}\left({}^{3}_{1}\mathrm{H}\right) = m\left({}^{3}_{1}\mathrm{H}\right) - m_e =$$
$$= 3{,}01604927 - 5{,}486 \cdot 10^{-4} = 3{,}01550067\ \mathrm{u}$$

Y para el helio-4:

$$m_{nuclear}\left({}^{4}_{2}\mathrm{He}\right) = m\left({}^{4}_{2}\mathrm{He}\right) - 2 \cdot m_e =$$
$$= 4{,}0026032 - 2 \cdot 5{,}486 \cdot 10^{-4} = 4{,}001506\ \mathrm{u}$$

**27 La masa atómica del ${}^{12}_{6}\mathrm{Cl}$ es 34,969 u. Calcula la energía de enlace por nucleón de su núcleo.**

Para calcular el defecto másico, debemos utilizar la masa nuclear del cloro-35:

$$m_{nuclear}\left({}^{35}_{17}\mathrm{Cl}\right) = m\left({}^{35}_{17}\mathrm{Cl}\right) - 17 \cdot m_e = 34{,}969 - 17 \cdot 5{,}486 \cdot 10^{-4} = 34{,}960\ \mathrm{u}$$

El defecto másico correspondiente a este núcleo es:

$$\Delta m\left({}^{35}_{17}\mathrm{Cl}\right) = 17 \cdot m_p + (35-17)\cdot m_n - m_{nuclear} =$$

$$= 17 \cdot 1,007276 + 18 \cdot 1,008665 - 34,690 = 0,319662\ \mathrm{u}$$

El equivalente energético de esta masa es la energía de enlace nuclear del cloro-35:

$$E_e\left({}^{35}_{17}\mathrm{Cl}\right) = \Delta m\left({}^{35}_{17}\mathrm{Cl}\right)\cdot 931,5\ \mathrm{MeV/u} = 0,319662 \cdot 931,5 = 297,77\ \mathrm{MeV}$$

La energía de enlace por nucleón del ${}^{35}_{17}\mathrm{Cl}$ es:

$$E_n\left({}^{35}_{17}\mathrm{Cl}\right) = \frac{E_e}{A} = \frac{297,77}{35} = 8,51\ \mathrm{MeV}$$

**28 El nucleido más estable es el ${}^{62}_{28}\mathrm{Ni}$. Calcula su energía de enlace por nucleón si su masa atómica es 61,92835 u.**

La masa nuclear del níquel-62 y su defecto másico es:

$$m_{nuclear}\left({}^{62}_{28}\mathrm{Ni}\right) = m\left({}^{62}_{28}\mathrm{Ni}\right) - 28 \cdot m_e = 61,92835 - 28 \cdot 5,486 \cdot 10^{-4} = 61,9129892\ \mathrm{u}$$

$$\Delta m = \left({}^{62}_{28}\mathrm{Ni}\right) = 28 \cdot m_p + (62-28)\cdot m_n - m_{nuclear} =$$

$$= 28 \cdot 1,007276 + 34 \cdot 1,008665 - 61,9129892 = 0,5853488\ \mathrm{u}$$

Y su equivalente energético:

$$E_e\left({}^{62}_{28}\mathrm{Ni}\right) = \Delta m\left({}^{62}_{28}\mathrm{Ni}\right)\cdot 931,5\ \mathrm{MeV/u} = 0,5853488 \cdot 931,5 = 545,25\ \mathrm{MeV}$$

La energía de enlace por nucleón del ${}^{62}_{28}\mathrm{Ni}$ será:

$$E_n\left({}^{62}_{28}\mathrm{Ni}\right) = \frac{E_e}{A} = \frac{545,25}{62} = 8,79\ \mathrm{MeV}$$

**29 Teniendo en cuenta que la masa atómica del ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$ es 12,000 u, y la del ${}^{13}_{6}\mathrm{C}$, 13,003 u, razona a cuál de ellos es más difícil arrancar un nucleón.**

Las masas nucleares de cada nucleido son:

$$m_{nuclear}\left({}^{12}_{6}\mathrm{C}\right) = m\left({}^{12}_{6}\mathrm{C}\right) - 6 \cdot m_e = 12,000 - 6 \cdot 5,486 \cdot 10^{-4} = 11,9967\ \mathrm{u}$$

$$m_{nuclear}\left({}^{13}_{6}\mathrm{C}\right) = m\left({}^{13}_{6}\mathrm{C}\right) - 6 \cdot m_e = 13,003 - 6 \cdot 5,486 \cdot 10^{-4} = 12,9997\ \mathrm{u}$$

Con estos valores calculamos las correspondientes energías de enlace por nucleón:

– Para el ${}^{12}_{6}\mathrm{C}$:

$$\Delta m\left({}^{12}_{6}\mathrm{C}\right) = 6 \cdot m_p + (12-6)\cdot m_n - m_{nuclear} =$$

$$= 6 \cdot 1,007276 + 6 \cdot 1,008665 - 11,9967 = 0,09895\ \mathrm{u}$$

$$E_e\left({}^{12}_{6}\mathrm{C}\right) = \Delta m\left({}^{12}_{6}\mathrm{C}\right)\cdot 931,5\ \mathrm{MeV/u} = 0,09895 \cdot 931,5 = 92,17\ \mathrm{MeV}$$

$$E_n\left({}^{12}_{6}\mathrm{C}\right) = \frac{E_e}{A} = \frac{92,17}{12} = 7,68\ \mathrm{MeV}$$

– Para el ${}^{13}_{6}\mathrm{C}$:

$$\Delta m\left({}^{13}_{6}\mathrm{C}\right) = 6 \cdot m_p + (13-6)\cdot m_n - m_{nuclear} =$$

$$= 6 \cdot 1,007276 + 7 \cdot 1,008665 - 12,9997 = 0,104611\ \mathrm{u}$$

$$E_e\left({}^{13}_{6}\mathrm{C}\right) = \Delta m\left({}^{13}_{6}\mathrm{C}\right)\cdot 931,5\ \mathrm{MeV/u} = 0,104611 \cdot 931,5 = 97,45\ \mathrm{MeV}$$

$$E_n\left({}^{13}_{6}\mathrm{C}\right) = \frac{E_e}{A} = \frac{97,45}{132} = 7,50\ \mathrm{MeV}$$

Será más difícil arrancar un nucleón del C-12, ya que su energía de enlace por nucleón es mayor.

# 8 Reacciones nucleares: fisión y fusión

## Página 349

**30 Calcula cuánto deuterio y tritio consumiría una central de 1 000 MW con un rendimiento del 25 %.**

Suponemos que en la central se realiza la siguiente reacción de fusión:

$$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n$$

En el ejercicio resuelto número 21 del libro del alumno se ha calculado la energía desprendida en esta reacción: $E_{producida} = 2{,}824 \cdot 10^{-12}$ J.

Como el rendimiento es del 25 %, la energía que se aprovecha en cada reacción es:

$$E_{útil} = 0{,}25 \cdot 2{,}824 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 7{,}06 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

Como la energía que genera la central en cada segundo es:

$$E_{generada} = P \cdot t = 10^{9} \text{ W} \cdot 1 \text{ s} = 10^{9} \text{ J}$$

el número de reacciones que tienen lugar para producir esta energía es:

$$N = \frac{E_{generada}}{E_{útil}} = \frac{10^{9} \text{ J}}{7{,}06 \cdot 10^{-13} \text{ J}} = 1{,}416 \cdot 10^{21} \text{ reacciones}$$

Por tanto, en cada segundo se consumen $1{,}416 \cdot 10^{21}$ átomos de deuterio y la misma cantidad de tritio.

Expresado en moles, esta cantidad de sustancia es:

$$n = \frac{N}{N_A} = \frac{1{,}416 \cdot 10^{21} \text{ átomos}}{6{,}022 \cdot 10^{23} \text{ átomos/mol}} = 2{,}35 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

Teniendo en cuenta las masas atómicas de estas dos sustancias (2,014101 u para el deuterio y 3,016049 u para el tritio), la masa que se consume de cada una de ellas en la central, cada segundo, es:

$$m_{deuterio} = 2{,}35 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot 2{,}014101 \text{ g/mol} = 4{,}73 \cdot 10^{-3} \text{ g de deuterio}$$

$$m_{tritio} = 2{,}35 \cdot 10^{-3} \text{ mol} \cdot 3{,}016049 \text{ g/mol} = 7{,}09 \cdot 10^{-3} \text{ g de tritio}$$

**31 ¿Cuánto carbón hay que quemar para obtener la misma energía que fisionando 5 kg de uranio-235?**

**Datos: Poder calorífico del carbón = 33 kJ/g; la energía desprendida en la fisión de un núcleo de uranio-235 es de 200 MeV.**

El número de átomos de uranio-235 presentes en 5 kg de esta sustancia, cuya masa atómica es 235,0439 u, es:

$$N = \frac{m}{N} \cdot N_A = \frac{5\,000 \text{ g}}{235{,}0439 \text{ g/mol}} \cdot 6{,}022 \cdot 10^{23} \text{ átomos/mol} = 1{,}281 \cdot 10^{25} \text{ átomos}$$

Como cada átomo libera, al fisionarse, 200 MeV, la energía liberada por la fisión de los 5 kg de uranio será:

$$E = 1{,}281 \cdot 10^{25} \text{ átomos} \cdot 2 \cdot 10^{8} \text{ eV} \cdot \frac{1{,}602 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} = 4{,}104 \cdot 10^{14} \text{ J}$$

Por otro lado, la energía que se libera al quemar una determinada masa de carbón es igual al producto de la masa por el poder calorífico del carbón. En este caso:

$$E = m \cdot 33\,000 \text{ J/g} = 4{,}104 \cdot 10^{14} \text{ J}$$

La masa de carbón que es necesario quemar para producir esta cantidad de energía es:

$$m = \frac{4,104 \cdot 10^{14}\ \text{J}}{33\,000\ \text{J/g}} = 1,244 \cdot 10^{10}\ \text{g} = 1,244 \cdot 10^{7}\ \text{kg}$$

Es decir, se necesita 2,5 millones de veces más carbón que uranio.

**32 Escribe la reacción de fusión de tres núcleos de $^{4}_{2}He$ para dar $^{12}_{6}C$, y haz el balance energético.**

La reacción de fusión propuesta es:

$$3\,^{4}_{2}\text{He} \rightarrow {}^{12}_{6}\text{C}$$

El balance de masas es:

$$\Delta m = 12 - 3 \cdot 4,002603 = -0,007809\ \text{u}$$

donde el dato de la masa atómica del He-4 se ha tomado de la tabla de la página 364. Aunque el cálculo debe hacerse con masas nucleares podemos usar las masas atómicas directamente, porque el número de electrones es similar en ambos miembros de la ecuación nuclear.

Como hay defecto de masa, el proceso será energéticamente favorable. La energía desprendida en el proceso de fusión se calcula directamente con la equivalencia entre u y MeV, o bien con la ecuación de Einstein que relaciona masa y energía:

$$E = 0,007809\ \text{u} \cdot 931,5\ \text{MeV/u} = 72,74\ \text{MeV}$$

Esta reacción de producción de carbono a partir de helio tiene lugar en el núcleo de las estrellas más grandes.

**33 Indica si las siguientes reacciones nucleares son correctas; en caso contrario, corrígelas:**

**a) $^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{141}_{56}Ba + ^{92}_{36}Kr + 2\,^{1}_{0}n$**

**b) $^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + 2\,^{1}_{0}n$**

Los símbolos y los números atómicos son correctos en ambas ecuaciones, pero:

a) No es correcta, porque $\Delta A = -1$, o sea, hay un nucleón más a la izquierda. La ecuación correcta implica la generación de tres neutrones:

$$^{235}_{92}\text{U} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{141}_{56}\text{Ba} + {}^{92}_{36}\text{Kr} + 3\,^{1}_{0}n$$

b) No es correcta, porque $\Delta A = +1$, es decir, hay un nucleón más a la derecha. La ecuación correcta implica la generación de un solo neutrón:

$$^{2}_{1}\text{H} + {}^{3}_{1}\text{H} \rightarrow {}^{4}_{2}\text{He} + {}^{1}_{0}n$$

# 9 El modelo estándar de partículas

### Página 351

**34 Cita las partículas subatómicas que conozcas, así como su antipartícula correspondiente.**

Las partículas subatómicas (es decir, del interior del átomo) son tres: protón, neutrón y electrón, con sus antipartículas antiprotón, antineutrón y positrón. De ellas, solo es fundamental el electrón; el resto están constituidas por quarks *u* y *d*.

**35 De todos los leptones, solo uno de ellos forma parte de la materia ordinaria. Indica cuál es.**

El electrón. De hecho, la materia está constituida íntegramente por solo tres partículas fundamentales: electrón, quark *u* y quark *d*.

**36 Explica la carga eléctrica del protón y del neutrón en función de los quarks que los constituyen.**

El protón está formado por dos quarks *u* (de carga 2/3) y uno *d* (de carga –1/3). Teniendo en cuenta la carga de estos quarks, la carga neta del protón es la unidad:

$$q_p = \frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3} = 1$$

El neutrón está formado por dos quarks *d* y uno *u*. Por ello, su carga es nula:

$$q_n = -\frac{1}{3} - \frac{1}{3} + \frac{2}{3} = 0$$

**37 Indica cuál es la partícula de campo de cada una de las interacciones fundamentales de la naturaleza.**

La pregunta se responde en la siguiente tabla:

| Interacción | Partícula de campo |
|---|---|
| Electromagnética | Fotón ($\gamma$) |
| Nuclear débil | Bosones vectoriales ($W^+$, $W^-$, $Z^0$) |
| Nuclear fuerte | Gluones (existen ocho) |
| Gravitatoria | Gravitón (hipotético) |

**38 El protón y el neutrón no son partículas elementales; cada una de ellas está formada por tres quarks. Busca información e indica de qué partículas elementales está formado cada uno de ellos.**

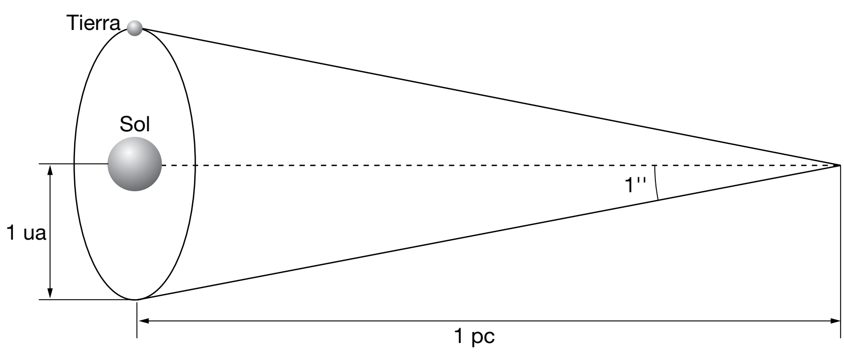
Ambos nucleones están formados por los quarks *up* y *down*. Mientras que un protón está formado por dos de tipo *up* (arriba) y uno de tipo *down* (abajo), el neutrón tiene un quark *up* y dos de tipo *down*. Por eso, la carga del protón es +1 y el neutrón no tiene carga.

# 10 Las fronteras de la física

## Página 357

**39 Busca la definición astronómica del parsec y explica por qué se llama así. Compara el parsec, el año luz y la unidad astronómica de distancia; ¿cuál es mayor?**

Cuando observamos un objeto, su anchura angular va disminuyendo según se va alejando. El parsec está relacionado con el tamaño de la órbita de la Tierra alrededor del Sol vista desde un astro lejano. El radio medio de la órbita terrestre se conoce en astronomía como unidad astronómica de distancia (ua o UA) y el parsec (pc) es la distancia desde la que una unidad astronómica subtiende un ángulo de un segundo de arco:



El nombre de parsec es un acrónimo que deriva del inglés ***par**allax of one arc **sec**ond* (paralaje de un segundo de arco o arcosegundo). De la definición resulta para un ángulo de paralaje $\alpha$ = 1″ que:

$$\alpha = 1'' = \frac{1°}{3\,600''} \cdot \frac{2 \cdot \pi \ \text{rad}}{360°} = 4{,}84814 \cdot 10^{-6} \ \text{rad}$$

$$tan\,\alpha \simeq \alpha = \frac{1 \ \text{ua}}{1 \ \text{pc}} = 4{,}84814 \cdot 10^{-6} \ \text{rad} \ \rightarrow \ 1 \ \text{pc} = 206\,265 \ \text{ua}$$

Como 1 ua = 149,598 · $10^9$ m y 1 año luz = 9,461 · $10^{15}$ m, queda:

$$1 \text{ pc} = 206\,265 \text{ ua} = 3{,}2615 \text{ año-luz} = 3{,}0857 \cdot 10^{16} \text{ m}$$

El parsec es muchísimo mayor que la unidad astronómica de distancia y algo más del triple que el año-luz.

**40** **La galaxia NGC 2787 está a 7,5 Mpc, pero el corrimiento al rojo indica que se aleja a 696 km/s. Calcula la velocidad de recesión que predice la ley de Hubble y compárala con la experimental.**

La ley de Hubble dice que:

$$v = H \cdot D$$

La velocidad de recesión dependerá del valor que se considere para la constante de Hubble. El mejor valor actual es $H$ = 73 km/s/Mpc; por tanto, la velocidad de recesión de la galaxia NGC 2787 debería de ser:

$$v = (73 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}/\text{Mpc}) \cdot 7{,}5 \text{ Mpc} = 547{,}5 \text{ km/s}$$

El valor experimental que indica el corrimiento Doppler al rojo es de 696 km/s que es parecido, pero no idéntico. Sin embargo, debe recordarse que la ley de Hubble es un promedio para miles de galaxias. Por tanto, la estimación de la ley de Hubble no es perfecta, pero supone una buena aproximación.

**41** **Explica si la siguiente proposición es correcta: «La materia oscura es la que hay dentro de los agujeros negros».**

La proposición es incorrecta. La materia oscura está distribuida dentro y en el entorno de las galaxias y su naturaleza es desconocida, pero no guarda relación con el interior de los agujeros negros.

**42** **La radiación cósmica de fondo se ajusta perfectamente a la de un cuerpo negro a 2,73 K. Investiga y responde a las siguientes cuestiones:**

**a) ¿De qué región del espacio exterior procede?**

**b) ¿Por qué su temperatura asociada es tan baja?**

a) La radiación de fondo se denomina así porque parece proceder del «fondo del universo»; es decir, no tiene ninguna dirección específica ni viene de ninguna fuente o región concreta. Llega de forma isótropa a cualquier punto del cosmos.

b) Aplicando las leyes del cuerpo negro, que la radiación de fondo sigue con exactitud, se comprueba que esta radiación corresponde a una temperatura global de solo 2,73 K. Los astrofísicos explican que cuando la radiación se generó, unos 380 000 años después del *big bang*, la temperatura del universo sería de 3 000 K y la radiación sería visible e infrarroja. Desde entonces, la expansión del universo ha hecho que esta radiación se distribuya en un espacio cada vez mayor de forma que su densidad se va reduciendo continuamente. La disminución de la densidad energética de la radiación que libremente circula por el cosmos implica un aumento de la longitud de onda (hasta llegar a las microondas) y una reducción de la temperatura.

**Página 364**

# Fenómenos radiactivos

**1 Di las características de las emisiones radiactivas.**

Son tres: emisión α, emisión β y emisión γ. Sus características son:

**Emisión alfa,** α: Está compuesta por núcleos de helio-4. Tiene un escaso poder de penetración, pues es frenada por una hoja de papel o unos cuantos centímetros de aire. Sin embargo, por su elevada masa, es una radiación con una alta capacidad de ionizar a los átomos con los que se encuentra.

**Emisión beta,** β: Está constituida por electrones. Su poder de penetración es más elevado que el de la emisión α, pues se necesitan algunos metros de aire o una lámina de metal para detenerla. Sin embargo, al ser los electrones más ligeros que las partículas α, esta emisión es menos ionizante.

**Emisión gamma,** γ: Es radiación electromagnética constituida por fotones muy energéticos. Tiene un poder de penetración muy alto, ya que se necesitan grandes espesores de hormigón o una plancha de plomo de algunos centímetros de espesor para detenerla, pero su capacidad de ionización es muy baja.

**2 Indica las afirmaciones ciertas y las falsas:**

**a) La emisión α es la más penetrante de todas.**

**b) La emisión γ es la más ionizante de todas.**

**c) Nuestra ropa nos protege de la radiación α.**

**d) La emisión γ no es desviada por un campo magnético, pero sí por un campo eléctrico.**

**e) La emisión α es la más ionizante.**

a) Falsa. La emisión más penetrante es la emisión γ.

b) Falsa. La emisión más ionizante es la emisión α.

c) Verdadera. La emisión α es detenida por una simple hoja de papel.

d) Falsa. La emisión γ está constituida por fotones muy energéticos, por lo que no es desviada por los campos electromagnéticos.

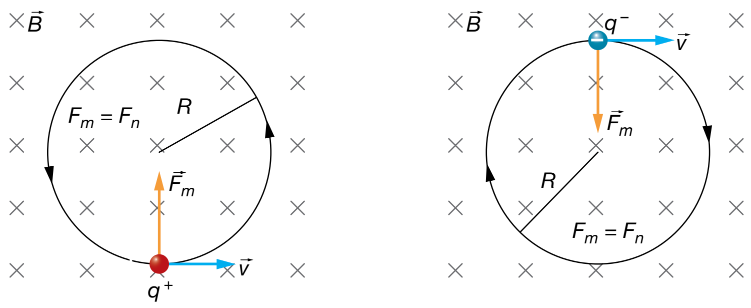
e) Verdadera. La emisión α, al estar constituida por partículas de alta carga y elevada masa, es la más ionizante.

**3 Di cómo se desviarán una partícula α y una partícula $\beta^-$ que se mueven horizontalmente de izquierda a derecha cuando atraviesen una zona donde existe un campo magnético uniforme que penetra perpendicularmente al plano del papel. ¿Qué le ocurre a una radiación γ que se mueva en el mismo sentido?**

Como vimos en la unidad 3, el campo magnético ejerce una fuerza sobre las partículas cargadas que se encuentran en movimiento que es proporcional a la carga de la partícula, a su velocidad y a la intensidad del campo magnético, de acuerdo con la ley de Lorentz.

Esta fuerza, perpendicular a la velocidad y al campo, obliga a la partícula a describir una trayectoria circular mientras se encuentre en el seno del campo magnético.

Con el campo descrito en el enunciado, la partícula alfa, cargada positivamente, seguirá una trayectoria circular en sentido antihorario, y la beta, de carga negativa, una trayectoria circular en sentido horario, ambas en el plano del papel:




La radiación gamma no se desvía, ya que no tiene carga eléctrica.

**4** **En la emisión γ no se emiten partículas materiales. ¿A qué se debe, entonces, este tipo de radiactividad? ¿Qué radiación es emitida?**

La emisión γ es radiación electromagnética constituida por fotones muy energéticos. Este tipo de emisión tiene lugar cuando el núcleo atómico pasa de un estado energético excitado a otro más estable (de menor energía).

Es una situación similar a la emisión de radiación electromagnética por parte de un electrón del átomo al saltar de un nivel superior de energía a otro inferior.

# El núcleo atómico

**5** **Calcula la composición del boro natural, formado por los isótopos $^{10}B$ y $^{11}B$, si su masa atómica es de 10,811 u.**

Si llamamos *x* al porcentaje del isótopo $^{10}B$ presente en el boro natural, el porcentaje del isótopo $^{11}B$ será 100 – x. Por tanto, podemos escribir:

$$10{,}811\,\text{u} = \frac{x \cdot 10{,}0129 + (100 - x) \cdot 11{,}0093}{100} \quad \to \quad x = 19{,}9\,\%$$

Es decir, el boro natural está compuesto por un 19,9 % del isótopo boro-10 y un 100 – 19,9 = = 80,1 % del isótopo $^{11}B$.

**6** **Copia y completa el cuadro siguiente:**

| Nucleido | Protones | Nucleones | Neutrones |
|---|---|---|---|
| $^{27}_{13}Al$ | | | |
| $^{209}_{82}Pb$ | | | |
| $^{232}_{90}Th$ | | | |
| $^{239}_{94}Pu$ | | | |
| $^{225}_{89}Ac$ | | | |
| $^{238}_{92}U$ | | | |

Teniendo en cuenta que, en los símbolos que representan a los núcleos, el subíndice hace referencia al número de protones o número atómico, *Z*, y que el superíndice nos indica el número de nucleones o número másico, $A = Z + N$, siendo *N* el número de neutrones, la tabla completa queda así:

| Nucleido | Protones | Nucleones | Neutrones |
|---|---|---|---|
| ${}^{27}_{13}\mathrm{Al}$ | 13 | 27 | 14 |
| ${}^{209}_{82}\mathrm{Pb}$ | 82 | 209 | 127 |
| ${}^{232}_{90}\mathrm{Th}$ | 90 | 232 | 142 |
| ${}^{239}_{94}\mathrm{Pu}$ | 94 | 239 | 145 |
| ${}^{225}_{89}\mathrm{Ac}$ | 89 | 225 | 136 |
| ${}^{238}_{92}\mathrm{U}$ | 92 | 238 | 146 |

## Procesos radiactivos. Series radiactivas

**7 Completa estos procesos radiactivos con las partículas y los números atómico y másico que faltan:**

**a)** ${}^{217}_{85}\mathrm{At} \rightarrow {}^{213}_{\dots}\mathrm{Bi} + \dots$

**b)** ${}^{217}_{85}\mathrm{Th} \rightarrow {}^{\dots}_{91}\mathrm{Pa} + \beta^-$

**c)** ${}^{229}_{90}\mathrm{Th} \rightarrow {}^{\dots}_{\dots}\mathrm{Ra} + \mathrm{a}$

**d)** ${}^{234}_{\dots}\mathrm{Pa} \rightarrow {}^{234}_{92}\mathrm{U} + \dots$

**e)** ${}^{239}_{\dots}\mathrm{Pu} \rightarrow {}^{235}_{92}\mathrm{U} + \dots$

**f)** ${}^{32}_{15}\mathrm{P} \rightarrow {}^{\dots}_{16}\mathrm{S} + \dots$

**g)** ${}^{\dots}_{\dots}\mathrm{Bi} \rightarrow {}^{210}_{81}\mathrm{Tl} + \alpha$

**h)** ${}^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}_{\dots}\mathrm{N} + \dots$

Teniendo en cuenta las leyes de conservación de la carga eléctrica y del número de nucleones, podemos escribir:

a) ${}^{217}_{85}\mathrm{At} \rightarrow {}^{213}_{83}\mathrm{Bi} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

b) ${}^{231}_{90}\mathrm{Th} \rightarrow {}^{231}_{91}\mathrm{Pa} + {}^{0}_{-1}\beta$

c) ${}^{229}_{90}\mathrm{Th} \rightarrow {}^{225}_{88}\mathrm{Ra} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

d) ${}^{234}_{91}\mathrm{Pa} \rightarrow {}^{234}_{92}\mathrm{U} + {}^{0}_{-1}\beta$

e) ${}^{239}_{94}\mathrm{Pu} \rightarrow {}^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

f) ${}^{32}_{15}\mathrm{P} \rightarrow {}^{32}_{16}\mathrm{S} + {}^{0}_{-1}\beta$

g) ${}^{214}_{83}\mathrm{Bi} \rightarrow {}^{210}_{81}\mathrm{Tl} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$

h) ${}^{14}_{6}\mathrm{C} \rightarrow {}^{14}_{7}\mathrm{N} + {}^{0}_{-1}\beta$

**8 El Rn-219 ($Z = 86$) emite una partícula $\alpha$ y se desintegra en Po, que, tras una emisión $\beta^-$, se convierte en At, que emite una partícula $\alpha$ y se transforma en Bi. Escribe el proceso completo.**

Teniendo en cuenta las leyes de los desplazamientos radiactivos (leyes de Soddy y Fajans), podemos escribir, para la primera desintegración $\alpha$:

$${}^{219}_{86}\mathrm{Rn} \rightarrow {}^{215}_{84}\mathrm{Po} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

Para la emisión $\beta^-$:

$${}^{215}_{84}\mathrm{Po} \rightarrow {}^{215}_{85}\mathrm{At} + {}^{0}_{-1}\beta$$

Y, finalmente, para la segunda desintegración $\alpha$:

$${}^{215}_{85}\mathrm{At} \rightarrow {}^{211}_{83}\mathrm{Bi} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

**9** **Comenta qué es una serie radiactiva, cuántas hay, qué nombre reciben y con qué nucleido comienza y termina cada una. Indica a qué serie radiactiva pertenece cada uno de los nucleidos siguientes:**

$$^{231}\text{Th} \;;\; ^{230}\text{Th} \;;\; ^{223}\text{Fr} \;;\; ^{210}\text{Tl} \;;\; ^{209}\text{Pb} \;;\; ^{208}\text{Pb}$$

Por serie radiactiva entendemos todos aquellos nucleidos que proceden de uno inicial, denominado nucleido padre, el cual, al desintegrarse, emite radiación $\alpha$ o $\beta$, dando lugar a otro nucleido diferente también radiactivo, que emite nuevas partículas $\alpha$ o $\beta$. El proceso continúa hasta la formación de un núcleo estable, es decir, no radiactivo.

Se conocen completas tres series radiactivas naturales y se tienen indicios de una cuarta, de las cuales forman parte la mayoría de los nucleidos radiactivos pesados. Todas comienzan en un nucleido muy poco radiactivo y terminan en un núcleo estable de plomo:

**Serie del torio.** Comienza con el $^{232}$Th y finaliza en el $^{208}$Pb. Los nucleidos de esta serie cumplen $A = 4 \cdot n$, con $n$ entero.

**Serie del uranio.** Comienza con el $^{238}$U y finaliza en el $^{206}$Pb. Los nucleidos de esta serie cumplen $A = 4 \cdot n + 2$, con $n$ entero.

**Serie del actinio.** Comienza con el $^{235}$U y finaliza en el $^{207}$Pb. Los nucleidos de esta serie cumplen $A = 4 \cdot n + 3$, con $n$ entero.

**Serie del neptunio.** Comienza con el $^{241}$Pu o $^{237}$Np y finaliza en el $^{209}$Bi. Sus nucleidos cumplen $A = 4 \cdot n + 1$, con $n$ entero. Como los cabezas de la familia son demasiado radiactivos, se han desintegrado desde la formación de la Tierra; sin embargo, conocemos algunos nucleidos hijo. Esta serie se ha obtenido completa artificialmente.

Sabiendo esto, para los nucleidos indicados en el enunciado, tenemos que:

$^{231}$Th: Pertenece a la serie del actinio, ya que cumple con la regla $A = 4 \cdot n + 3$, con $n = 57$.

$^{230}$Th: Pertenece a la serie del uranio, ya que cumple $A = 4 \cdot n + 2$, con $n = 57$.

$^{223}$Fr: Pertenece a la serie del actinio, ya que cumple $A = 4 \cdot n + 3$, con $n = 55$.

$^{210}$Tl: Pertenece a la serie del uranio, ya que cumple $A = 4 \cdot n + 2$, con $n = 52$.

$^{209}$Pb: Pertenece a la serie del neptunio, ya que cumple $A = 4 \cdot n + 1$, con $n = 52$.

$^{208}$Pb: Pertenece a la serie del torio, ya que cumple $A = 4 \cdot n$, con $n = 52$.

**10** **Explica si estas reacciones nucleares son posibles:**

**a)** $^{1}_{1}\text{H} + {}^{3}_{2}\text{He} \rightarrow {}^{4}_{2}\text{He}$

**b)** $^{59}_{27}\text{Co} + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{56}_{25}\text{Mn} + {}^{4}_{2}\text{He}$

**c)** $^{4}_{2}\text{He} + {}^{27}_{13}\text{Al} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + {}^{1}_{0}n$

**d)** $^{124}_{51}\text{Sb} \rightarrow {}^{124}_{52}\text{Te} + {}^{1}_{0}n$

a) No es posible, ya que no se conserva el número de protones, es decir, la carga eléctrica (3 en el primer miembro y 2 en el segundo).

b) Sí es posible, ya que se conserva el número de protones, 27, y el de nucleones, 60.

c) Sí es posible, ya que se conserva el número de protones, 15, y el de nucleones, 31.

d) También es posible, ya que se cumplen las leyes de los desplazamientos radiactivos.

**11** **Si un isótopo radiactivo emite sucesivamente una partícula $\alpha$, dos $\beta^-$ y una radiación $\gamma$, el número atómico del elemento producido respecto al inicial:**

**a) Ha aumentado en dos unidades.**

**b) Ha disminuido en dos unidades.**

**c) No ha variado.**

La emisión de radiación $\gamma$ no produce ninguna variación en el número de nucleones.

Teniendo en cuenta las leyes de los desplazamientos radiactivos, podemos escribir:

$${}^{A}_{Z}X \xrightarrow{{}^{4}_{2}H} {}^{A-4}_{Z-2}Y \xrightarrow{{}^{0}_{-1}e} {}^{A-4}_{Z-1}Y \xrightarrow{{}^{0}_{-1}e} {}^{A-4}_{Z}W$$

Siendo *W* el isótopo obtenido finalmente. Por tanto, la respuesta correcta es la c), ya que varía el número másico, pero el número atómico permanece constante.

**Página 365**

**12 El ${}^{234}_{92}U$ se convierte en ${}^{218}_{84}Po$ después de experimentar una serie de desintegraciones α. Escribe el proceso completo.**

Puesto que el número atómico, *Z*, disminuye en 92 – 84 = 8 unidades, el proceso completo incluye cuatro emisiones α. Por tanto, el número másico debe disminuir en 4 · 4 = 16 unidades, hecho que, efectivamente, ocurre: 234 – 218 = 16.

Así, las desintegraciones que tienen lugar son:

$${}^{234}_{92}U \rightarrow {}^{230}_{90}X + {}^{4}_{2}He$$

$${}^{230}_{90}X \rightarrow {}^{226}_{88}Y + {}^{4}_{2}He$$

$${}^{226}_{88}Y \rightarrow {}^{222}_{86}Z + {}^{4}_{2}He$$

$${}^{222}_{86}Z \rightarrow {}^{218}_{84}Po + {}^{4}_{2}He$$

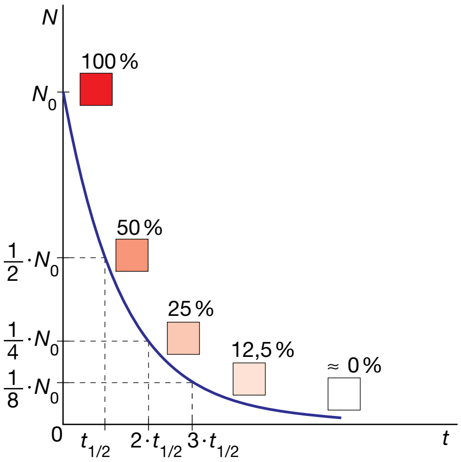
Utilizando el sistema periódico identificamos los elementos *X*, *Y* y *Z* con el torio, Th; el radio, Ra, y el radón, Rn, respectivamente.

# Ley de la desintegración radiactiva

**13 Un isótopo radiactivo tiene un período de semidesintegración de una hora. Indica qué parte de la muestra queda sin desintegrar al cabo de una, dos, tres y cuatro horas.**

Puesto que el período de semidesintegración es de una hora ($t_{1/2}$ = 1 h) y teniendo en cuenta la definición de esta magnitud, tenemos:

- Al cabo de 1 h quedará la mitad de la muestra.
- Al cabo de 2 h quedará la mitad de la muestra que quedó en la hora anterior; es decir, la cuarta parte de la muestra inicial.
- Al cabo de 3 h la muestra se habrá vuelto a reducir a la mitad, por lo que quedará la octava parte de la muestra inicial.
- Al cabo de 4 h, la muestra resultante será la dieciseisava parte de la muestra inicial.




**14 La constante radiactiva del cobalto-60 vale 0,13 años$^{-1}$ y su masa atómica es de 59,93 u. Calcula:**

**a) Su período de semidesintegración y vida media.**

**b) La actividad de una muestra de 10 g de ese isótopo.**

**c) El tiempo que ha de transcurrir para que en la muestra anterior queden 2,5 g del isótopo.**

a) A partir de la constante radiactiva del cobalto-60, calculamos su período de semidesintegración:

$$t_{1/2} = \frac{ln\ 2}{\lambda} = \frac{ln\ 2}{0,13\ a^{-1}} = 5,33\ a$$

Y su vida media será:

$$\tau_m = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0,13 \text{ a}^{-1}} = 7,69 \text{ a}$$

b) La actividad de la muestra está relacionada con la constante radiactiva, $\lambda$, y el número de núcleos, $N$, mediante:

$$A = \lambda \cdot N$$

Teniendo en cuenta la masa atómica del cobalto-60, 59,93 u, la masa de un mol de átomos de este isótopo será 59,93 g, lo que nos permite determinar el número de núcleos presentes en la muestra inicial, $N$:

$$\frac{59,93 \text{ g/mol}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ núcleos/mol}} = \frac{10 \text{ g}}{N} \rightarrow N = 1,005 \cdot 10^{23} \text{ núcleos}$$

Si expresamos la constante radiactiva en unidades del SI, queda:

$$\lambda = 0,13 \text{ a}^{-1} \cdot \frac{1 \text{ a}}{365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s}} = 4,12 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}$$

Sustituyendo, la actividad de la muestra resulta:

$$A = \lambda \cdot N = 4,12 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1} \cdot 1,005 \cdot 10^{23} \text{ núcleos} = 4,14 \cdot 10^{14} \text{ Bq}$$

c) Aplicamos la expresión de la ley de la desintegración radiactiva aplicada a la masa:

$$m = m_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \rightarrow 2,5 = 10 \cdot e^{-0,13 \cdot t} \rightarrow 0,25 = e^{-0,13 \cdot t}$$

Tomando logaritmos neperianos y despejando, el tiempo necesario resulta:

$$ln\ 0,25 = -0,13 \cdot t \rightarrow t = \frac{ln\ 0,25}{0,13} = 10,66 \text{ a}$$

Este resultado lo podíamos haber previsto teniendo en cuenta que al cabo de 5,33 años ($t_{1/2}$) la cantidad de muestra se habrá reducido a la mitad, 5 g, y pasados otros 5,33 años quedarán 2,5 g, que es la cuarta parte de la masa inicial.

**15** **Tenemos una muestra de 8 g de $^{124}_{55}Cs$, de 30,8 s de vida media y masa atómica 124 u. Calcula:**

**a) El período de semidesintegración y la constante radiactiva de este isótopo.**

**b) La actividad de la muestra inicialmente y cuando han transcurrido 2 minutos.**

a) Del valor de la vida media obtenemos el de la constante radiactiva:

$$\lambda = \frac{1}{\tau_m} = \frac{1}{30,8 \text{ s}} = 0,0325 \text{ s}^{-1}$$

Y de esta, el del período de semidesintegración:

$$t_{1/2} = \frac{ln\ 2}{\lambda} = \frac{ln\ 2}{0,0325 \text{ s}^{-1}} = 21,3 \text{ s}$$

b) Teniendo en cuenta la masa atómica del isótopo $^{124}Cs$, aproximadamente 124 u, el número de núcleos presentes en 8 g de muestra vale:

$$\frac{124 \text{ g/mol}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ núcleos/mol}} = \frac{8 \text{ g}}{N_0} \rightarrow N_0 = 3,885 \cdot 10^{22} \text{ núcleos}$$

La actividad inicial de la muestra resulta:

$$A_0 = \lambda \cdot N_0 = 0,0325 \text{ s}^{-1} \cdot 3,885 \cdot 10^{22} \text{ núcleos} = 1,263 \cdot 10^{21} \text{ Bq}$$

La actividad de la muestra a los 2 min (120 s) la obtenemos sustituyendo en la expresión de la ley de la desintegración radiactiva:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \rightarrow A = 1,263 \cdot 10^{21} \text{ Bq} \cdot e^{-0,0325 \cdot 120} = 2,557 \cdot 10^{19} \text{ Bq}$$

**16** **La actividad de una muestra de 2 g de cobalto-60 es de 8,4 · 10[13] Bq. Calcula la constante radiactiva, la vida media y el período de semidesintegración de ese isótopo radiactivo.**

Teniendo en cuenta la masa atómica del isótopo $^{60}Co$, 59,93 u (dato tomado de la actividad número 14), los 2 g de muestra contienen:

$$\frac{59{,}93 \text{ g/mol}}{6{,}022 \cdot 10^{23} \text{ núcleos/mol}} = \frac{2 \text{ g}}{N} \quad \rightarrow \quad N = 2{,}01 \cdot 10^{22} \text{ núcleos de } ^{60}\text{C}$$

A partir de la definición de la actividad, despejamos el valor de la constante radiactiva; sustituyendo los datos de que disponemos, obtenemos su valor:

$$A = \lambda \cdot N \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{A}{N} = \frac{8{,}4 \cdot 10^{13} \text{ Bq}}{2{,}01 \cdot 10^{22} \text{ núcleos}} = 4{,}18 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}$$

La vida media será:

$$\tau_m = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{4{,}18 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}} = 2{,}4 \cdot 10^{8} \text{ s} = 7{,}6 \text{ a}$$

Y el período de semidesintegración:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{\ln 2}{4{,}18 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}} = 1{,}66 \cdot 10^{8} \text{ s} = 5{,}2 \text{ a}$$

**17** **En 20 días una muestra de 32 g de Bi-210, de masa atómica 209,98 u, se ha reducido a 2 g. Calcula:**

**a) Su período de semidesintegración.**

**b) Su constante radiactiva.**

**c) Su vida media.**

**d) La actividad de las muestras inicial y final.**

a) Teniendo en cuenta la expresión que describe la evolución de la masa de una muestra radiactiva con el tiempo y sustituyendo datos:

$$m = m_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \rightarrow \quad 2 = 32 \cdot e^{-\lambda \cdot 20}$$

Despejando, obtenemos el valor de la constante radiactiva:

$$-\lambda \cdot 20 = \ln \frac{2}{32} \quad \rightarrow \quad \lambda = 0{,}139 \text{ d}^{-1} \cdot \frac{1 \text{ d}}{24 \cdot 60 \cdot 60 \text{ s}} = 1{,}61 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

El período de semidesintegración valdrá:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{\ln 2}{1{,}61 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}} = 4{,}31 \cdot 10^{5} \text{ s}$$

b) El valor de la constante radiactiva ya lo hemos obtenido en el apartado anterior.

c) La vida media es el inverso de la constante radiactiva:

$$\tau_m = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{1{,}61 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}} = 6{,}21 \cdot 10^{5} \text{ s}$$

d) Teniendo en cuenta la masa atómica del isótopo bismuto-210, 209,98 u, el número de núcleos presentes en 32 g de muestra es:

$$\frac{209{,}98 \text{ g/mol}}{6{,}022 \cdot 10^{23} \text{ núcleos/mol}} = \frac{32 \text{ g}}{N_0} \quad \rightarrow \quad N_0 = 9{,}18 \cdot 10^{22} \text{ núcleos}$$

La actividad inicial de la muestra era:

$$A_0 = \lambda \cdot N_0 = 1{,}61 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1} \cdot 9{,}18 \cdot 10^{22} \text{ núcleos} = 1{,}48 \cdot 10^{17} \text{ Bq}$$

La actividad final de la muestra valdrá:

$$A_f = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \rightarrow \quad A_f = 1{,}48 \cdot 10^{17} \text{ Bq} \cdot e^{-0{,}139 \cdot 20} = 9{,}18 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$$

**18** **Para el tratamiento del hipertiroidismo, se utiliza el isótopo radiactivo $^{131}I$, que se concentra en la glándula tiroides, destruyendo células. Su período de semidesintegración es de 8 días. Si tenemos 10 mg de yodo-131, de masa atómica 130,91 u, calcula:**

**a) El tiempo que tardan en desintegrarse 7,5 mg.**

**b) La masa que queda sin desintegrar a los 4 días.**

**c) La actividad inicial de la muestra y a los 16 días.**

a) Como el período de semidesintegración es de 8 días, la constante radiactiva es:

$$t_{1/2} = \frac{ln\,2}{\lambda} \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{ln\,2}{8\ \text{d}} = 0{,}0866\ \text{d}^{-1}$$

Si se desintegran 7,5 mg, quedarán en la muestra 10 – 7,5 = 2,5 mg; luego:

$$m = m_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \rightarrow \quad 2{,}5 = 10 \cdot e^{-0{,}0866 \cdot t} \quad \rightarrow \quad 0{,}25 = e^{-0{,}0866 \cdot t}$$

Tomando logaritmos neperianos y despejando, el tiempo necesario resulta:

$$ln\,0{,}25 = -0{,}0866 \cdot t \quad \rightarrow \quad t = -\frac{ln\,0{,}25}{0{,}0866} = 16\ \text{d}$$

A este mismo resultado habríamos llegado teniendo en cuenta que la masa que queda sin desintegrar en la muestra es una cuarta parte de la masa inicial, por lo que el tiempo transcurrido debe ser el doble del período de semidesintegración.

b) Al cabo de cuatro días quedará:

$$m = m_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \rightarrow \quad m = 10 \cdot e^{-0{,}0866 \cdot 4} \quad \rightarrow \quad m = 7{,}07\ \text{mg}$$

c) Como la masa atómica del yodo-131 es de 130,91 u, el número de núcleos radiactivos que hay inicialmente vale:

$$\frac{130{,}91\,\text{g/mol}}{6{,}022 \cdot 10^{23}\ \text{núcleos/mol}} = \frac{0{,}01\,\text{g}}{N_0} \quad \rightarrow \quad N_0 = 4{,}6 \cdot 10^{19}\ \text{núcleos}$$

Luego, la actividad inicial de la muestra es:

$$A_0 = \lambda \cdot N_0 = 0{,}0866\ \text{d}^{-1} \cdot \frac{1\,\text{d}}{24 \cdot 60 \cdot 60\ \text{s}} \cdot 4{,}6 \cdot 10^{19}\ \text{núcleos} = 4{,}61 \cdot 10^{13}\ \text{Bq}$$

Al cabo de 16 días, la actividad de la muestra vale:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \rightarrow \quad A = 4{,}61 \cdot 10^{13}\ \text{Bq} \cdot e^{-0{,}0866 \cdot 16} = 1{,}15 \cdot 10^{13}\ \text{Bq}$$

Como vemos, es la cuarta parte de la actividad inicial.

**19** **El período de semidesintegración del estroncio-90 es de 28 años. ¿Qué tiempo ha de transcurrir para que una muestra de 4 mg se reduzca un 80 %? ¿Cuál es la vida media de un núcleo de este isótopo?**

Como el período de semidesintegración es de 28 años, la constante radiactiva de este isótopo vale:

$$t_{1/2} = \frac{ln\,2}{\lambda} \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{ln\,2}{28\ \text{a}} = 0{,}025\ \text{a}^{-1}$$

La muestra se reduce un 80 %, por lo que la masa final será un 20 % de la inicial, es decir, $0{,}2 \cdot m_0$.

Aplicando la ley de la desintegración radiactiva expresada en función de la masa, tenemos:

$$m = m_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad \rightarrow \quad 0{,}2 \cdot m_0 = m_0 \cdot e^{-0{,}025 \cdot t} \quad \rightarrow \quad 0{,}2 = e^{-0{,}025 \cdot t}$$

Tomando logaritmos neperianos y despejando, el tiempo necesario resulta:

$$ln\,0{,}2 = -0{,}025 \cdot t \quad \rightarrow \quad t = -\frac{ln\,0{,}2}{0{,}025} = 64{,}38\ \text{a}$$

La vida media de un núcleo de este isótopo es:

$$\tau_m = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0{,}025\ \text{a}^{-1}} = 40\ \text{años}$$

**20** **Una planta fosilizada cuenta con un 30 % del carbono-14 que tiene una planta actual. Estima su edad si, para este isótopo, $t_{1/2}$ = 5 730 años.**

La actividad de la muestra es el 30 % de la inicial, ya que el número de radionucleidos ha bajado en esa proporción.

Por tanto, aplicando la ley de la desintegración radiactiva:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \ \rightarrow\ 0{,}3 \cdot A_0 = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \ \rightarrow\ 0{,}3 = e^{-\lambda \cdot t}$$

Del dato del período de semidesintegración obtenemos el valor de la constante radiactiva:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{\ln 2}{5\,730\ \text{a}} = 1{,}21 \cdot 10^{-4}\ \text{a}^{-1}$$

Sustituyendo este valor en la ley de la desintegración radiactiva, tomando logaritmos neperianos y despejando, calculamos la edad de la planta fosilizada; es decir, el tiempo transcurrido desde que la planta murió y dejó de renovar el carbono que la compone:

$$\ln 0{,}3 = -1{,}21 \cdot 10^{-4}\ \text{a}^{-1} \cdot t \quad \rightarrow \quad t = -\frac{\ln 0{,}3}{1{,}21 \cdot 10^{-4}\ \text{a}^{-1}} = 9\,960\ \text{a}$$

**21** **De una muestra radiactiva, cuya masa atómica es 257 u, se han desintegrado en un día el 10 % de sus núcleos. Si inicialmente había 50 g, calcula:**

**a) Su constante radiactiva y su vida media.**

**b) La cantidad que quedará al cabo de tres días.**

**c) Los núcleos que quedan a los dos días.**

a) Si inicialmente había $N_0$ núcleos radiactivos en la muestra, al cabo de un día se habrá desintegrado la décima parte de ellos, por lo que quedarán 0,9 · $N_0$ núcleos. Introduciendo estos valores en la expresión de la ley de la desintegración radiactiva y despejando, obtenemos la constante radiactiva:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \rightarrow 0{,}9 \cdot N_0 = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot 1\,\text{d}} \rightarrow \ln 0{,}9 = -\lambda \rightarrow \lambda = 0{,}105\ \text{d}^{-1}$$

La vida media del nucleido radiactivo es:

$$\tau_m = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0{,}105\ \text{d}^{-1}} = 0{,}52\ \text{d}$$

b) A los tres días, la masa de la muestra se habrá reducido hasta el valor:

$$m = m_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \rightarrow m_0 = 50\ \text{g} \cdot e^{-0{,}105 \cdot 3} = 36{,}49\ \text{g}$$

c) A los dos días queda una masa de sustancia radiactiva:

$$m = m_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \rightarrow m_0 = 50\ \text{g} \cdot e^{-0{,}105 \cdot 2} = 40{,}53\ \text{g}$$

Teniendo en cuenta el valor de la masa atómica, 257 u, el número de núcleos radiactivos que contendrá la muestra en ese instante será:

$$N = \frac{m}{M} \cdot N_A = \frac{40{,}53\ \text{g}}{257\ \text{g/mol}} \cdot 6{,}022 \cdot 10^{23}\ \text{núcleos/mol} = 9{,}497 \cdot 10^{22}\ \text{núcleos}$$

**22** **Si un cofre de madera tiene un contenido de carbono-14 que resulta ser el 48 % del contenido en la madera de un árbol de la actualidad, ¿cuál es su edad? Dato: $t_{1/2}$ = 5 730 años.**

Aplicando la ley de la desintegración radiactiva expresada en función de los núcleos radiactivos presentes en la muestra:

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \rightarrow 0{,}48 \cdot N_0 = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \rightarrow 0{,}48 = e^{-\lambda \cdot t}$$

Para resolver esta ecuación, necesitamos conocer el valor de la constante radiactiva del carbono-14, que obtenemos como sigue:

$$t_{1/2} = \frac{ln\ 2}{\lambda} \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{ln\ 2}{5\,730\ \text{a}} = 1,209 \cdot 10^{-4}\ \text{a}^{-1}$$

Sustituyendo, tomando logaritmos neperianos y despejando, la edad del cofre resulta:

$$ln\ 0,48 = -1,209 \cdot 10^{-4}\ \text{a}^{-1} \cdot t \quad \rightarrow \quad t = -\frac{ln\ 0,48}{1,209 \cdot 10^{-4}\ \text{a}^{-1}} = 6\,070\ \text{a}$$

**23** **Una muestra de material radiactivo tiene una actividad de 115 Bq inmediatamente después de ser extraída del reactor donde se formó. Su actividad 2 horas después es de 85,2 Bq:**

**a) Calcula el período de semidesintegración de la muestra.**

**b) ¿Cuántos núcleos radiactivos había inicialmente en la muestra?**

a) La actividad de la muestra radiactiva decae con el tiempo según la expresión:

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

Sustituyendo los datos del enunciado y despejando, calculamos la constante de desintegración radiactiva, $\lambda$:

$$85,2 = 115 \cdot e^{-\lambda \cdot 2 \cdot 3600} \rightarrow 0,74 = e^{-\lambda \cdot 2 \cdot 3600}$$

$$ln\ 0,74 = -\lambda \cdot 2 \cdot 3\,600 \rightarrow -0,30 = -\lambda \cdot 2 \cdot 3\,600 \rightarrow \lambda = 4,17 \cdot 10^{-5}\ \text{s}^{-1}$$

De la relación entre el período de semidesintegración y la constante radiactiva, calculamos esta última:

$$t_{1/2} = \frac{ln\ 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad \rightarrow \quad t_{1/2} = \frac{0,693}{4,17 \cdot 10^{-5}} = 16\,618,7\ \text{s} = 4,62\ \text{h}$$

b) Teniendo en cuenta que la actividad en un determinado instante es proporcional al número de núcleos radiactivos presentes en ese momento, se puede calcular cuántos existían originalmente en la muestra, ya que la actividad inicial era 115 Bq:

$$A = \lambda \cdot N \rightarrow 115 = 4,17 \cdot 10^{-5} \cdot N$$

$$N = \frac{115}{4,17 \cdot 10^{-5}} = 2,76 \cdot 10^{6}\ \text{núcleos radiactivos}$$

**Página 366**

**24** **El tritio, $^{3}_{1}H$, se desintegra emitiendo una partícula $\beta$, y tiene un período de semidesintegración de 12,5 años. Escribe la reacción nuclear que se produce y calcula el tiempo que lleva embotellada un agua mineral si la actividad debida al tritio es el 80 % de la que tiene en el manantial.**

La reacción de desintegración del tritio es:

$$^{3}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + {}^{0}_{-1}\beta$$

Del período de semidesintegración del tritio obtenemos la constante radiactiva:

$$t_{1/2} = \frac{ln\ 2}{\lambda} \quad \rightarrow \quad \lambda = \frac{ln\ 2}{12,5\ \text{a}} = 0,055\ \text{a}^{-1}$$

Como la actividad debida al tritio es el 80 % de la que tiene el manantial, tenemos:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \rightarrow 0,8 \cdot A_0 = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \rightarrow 0,8 = e^{-0,055 \cdot t}$$

Operando, se obtiene el tiempo que lleva embotellada el agua:

$$ln\ 0,8 = -0,055\ \text{a}^{-1} \cdot t \quad \rightarrow \quad t = -\frac{ln\ 0,8}{0,055\ \text{a}^{-1}} = 4,06\ \text{a}$$

# Interacción fuerte y estabilidad nuclear

**25** **Clasifica las interacciones fundamentales en función de su radio de acción y de su intensidad.**

Las interacciones fundamentales, ordenadas de menor a mayor radio de acción, son: débil, fuerte, gravitatoria y electromagnética (con el mismo alcance estas dos últimas).

En función de su intensidad (también de menor a mayor), el orden sería: gravitatoria, débil, electromagnética y fuerte.

**26** **Calcula la energía de enlace por nucleón del tritio. ¿Cuánta energía hay que suministrar para disgregar un gramo de tritio en protones y neutrones?**

La masa de un núcleo de tritio es su masa atómica, 3,016049 u, menos la masa del electrón de la corteza atómica:

$$m_{nuclear} = m - m_e = 3{,}016049 - 5{,}486 \cdot 10^{-4} = 3{,}015500 \text{ u}$$

El defecto másico correspondiente a este núcleo es:

$$\Delta m\,({}^3_1\text{H}) = m_p + (3-1)\cdot m_n - m_{nuclear} = 1{,}007276 + 2 \cdot 1{,}008665 - 3{,}015500 = 9{,}106 \cdot 10^{-3} \text{ u}$$

El equivalente energético de esta masa es la energía de enlace nuclear del tritio:

$$E_e\,({}^3_1\text{H}) = \Delta m\,({}^3_1\text{H}) \cdot 931{,}5 \text{ MeV/u} = 9{,}106 \cdot 10^{-3} \text{ u} \cdot 931{,}5 \text{ MeV/u} = 8{,}48 \text{ MeV}$$

Dividiendo este valor por el número de nucleones, obtenemos la energía de enlace por nucleón del tritio:

$$E_n\,({}^3_1\text{H}) = \frac{E_e}{A} = \frac{8{,}48}{3} = 2{,}83 \text{ MeV}$$

Para obtener la energía necesaria para disgregar un gramo de tritio, necesitamos saber la cantidad de núcleos que contiene esta masa. Para ello, utilizamos el valor de la masa atómica del tritio:

$$\frac{3{,}016049 \text{ g/mol}}{6{,}022 \cdot 10^{23} \text{ atómos/mol}} = \frac{1 \text{ g}}{N} \quad \rightarrow \quad N = 1{,}997 \cdot 10^{23} \text{ atómos}$$

Por tanto, teniendo en cuenta la energía de ligadura de cada núcleo de tritio, la energía de disgregación de esos 1,997 · 1023 núcleos será:

$$E = E_e\,({}^3_1\text{H}) \cdot N = 8{,}48 \cdot 10^6 \text{ eV} \cdot \frac{1{,}602 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} \cdot 1{,}997 \cdot 10^{23} = 2{,}71 \cdot 10^{11} \text{ J}$$

Para calcular esta energía no hemos tenido en cuenta la energía extra que habría que proporcionar para arrancar los electrones del átomo.

**27** **Calcula la energía de enlace y la energía de enlace por nucleón para los núcleos:**

**a)** $^{40}_{20}\text{Ca}$. **b)** $^{57}_{26}\text{Fe}$. **c)** $^{238}_{92}\text{U}$. **d)** $^{230}_{90}\text{Th}$.

a) Calcio-40:

El defecto másico correspondiente a este núcleo es:

$$\Delta m\,({}^{40}_{20}\text{Ca}) = 20 \cdot m_p + (40-20) \cdot m_n - (m_{atómica} - 20 \cdot m_e)$$

$$\Delta m\,({}^{40}_{20}\text{Ca}) = 20 \cdot 1{,}007276 + 20 \cdot 1{,}008665 - (39{,}9626 - 20 \cdot 5{,}486 \cdot 10^{-4}) = 0{,}36719 \text{ u}$$

El equivalente energético de esta masa es la energía de enlace nuclear:

$$E_e\,({}^{40}_{20}\text{Ca}) = \Delta m\,({}^{40}_{20}\text{Ca}) \cdot 931{,}5 \text{ MeV/u} = 0{,}36719 \text{ u} \cdot 931{,}5 \text{ MeV/u} = 342{,}04 \text{ MeV}$$

Dividiendo este valor por el número de nucleones, obtenemos la energía de enlace por nucleón:

$$E_n\,({}^{40}_{20}\text{Ca}) = \frac{E_e}{A} = \frac{342{,}04}{40} = 8{,}55\ \text{MeV}$$

b) Hierro-57:

$$\Delta m\,({}^{57}_{26}\text{Fe}) = 26 \cdot m_p + (57 - 26) \cdot m_n - (m_{atómica} - 26 \cdot m_e)$$

$$\Delta m\,({}^{57}_{26}\text{Fe}) = 26 \cdot 1{,}007276 + 57 \cdot 1{,}008665 - (56{,}9354 - 26 \cdot 5{,}486 \cdot 10^{-4}) = 0{,}5367\ \text{u}$$

$$E_e\,({}^{57}_{26}\text{Fe}) = \Delta m\,({}^{57}_{26}\text{Fe}) \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 0{,}5367\ \text{u} \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 499{,}94\ \text{MeV}$$

$$E_n\,({}^{57}_{26}\text{Fe}) = \frac{E_e}{A} = \frac{499{,}94}{57} = 8{,}77\ \text{MeV}$$

c) Uranio-238:

$$\Delta m\,({}^{238}_{92}\text{U}) = 92 \cdot m_p + (238 - 92) \cdot m_n - (m_{atómica} - 92 \cdot m_e)$$

$$\Delta m\,({}^{238}_{92}\text{U}) = 92 \cdot 1{,}007276 + 146 \cdot 1{,}008665 - (238{,}05078 - 92 \cdot 5{,}486 \cdot 10^{-4}) = 1{,}93427\ \text{u}$$

$$E_e\,({}^{238}_{92}\text{U}) = \Delta m\,({}^{238}_{92}\text{U}) \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 1{,}9342\ \text{u} \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 1801{,}7\ \text{MeV}$$

$$E_n\,({}^{238}_{92}\text{U}) = \frac{E_e}{A} = \frac{1801{,}7}{238} = 7{,}57\ \text{MeV}$$

d) Torio-230:

$$\Delta m\,({}^{230}_{90}\text{TH}) = 90 \cdot m_p + (230 - 90) \cdot m_n - (m_{atómica} - 90 \cdot m_e)$$

$$\Delta m\,({}^{230}_{90}\text{Th}) = 90 \cdot 1{,}007276 + 140 \cdot 1{,}008665 - (230{,}03313 - 90 \cdot 5{,}486 \cdot 10^{-4}) = 1{,}8842\ \text{u}$$

$$E_e\,({}^{230}_{90}\text{Th}) = \Delta m\,({}^{230}_{90}\text{Th}) \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 1{,}8842\ \text{u} \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 1755{,}1\ \text{MeV}$$

$$E_n\,({}^{230}_{90}\text{Th}) = \frac{E_e}{A} = \frac{1755{,}1}{230} = 7{,}63\ \text{MeV}$$

**28 Determina la energía de enlace del ${}^{14}_{7}\text{N}$ y del ${}^{15}_{7}\text{N}$, en eV. ¿Cuál es el más estable?**

Para determinar cuál de los dos nucleidos es más estable, calculamos sus respectivas energías de enlace por nucleón. Para ello, debemos calcular, en primer lugar, sus masas nucleares:

$$m_{nuclear}\,({}^{14}_{7}\text{N}) = m\,({}^{14}_{7}\text{N}) - 7 \cdot m_e = 14{,}00307 - 7 \cdot 5{,}486 \cdot 10^{-4} = 13{,}9992\ \text{u}$$

$$m_{nuclear}\,({}^{15}_{7}\text{N}) = m\,({}^{15}_{7}\text{N}) - 7 \cdot m_e = 15{,}00011 - 7 \cdot 5{,}486 \cdot 10^{-4} = 14{,}9963\ \text{u}$$

Con estos valores calculamos las correspondientes energías de enlace por nucleón; para ello calculamos primero, en cada caso, el defecto de masa y la energía de enlace:

– Para el (${}^{14}_{7}\text{N}$):

$$\Delta m\,({}^{14}_{7}\text{N}) = 7 \cdot m_p + (14 - 7) \cdot m_n - m_{nuclear} =$$

$$= 7 \cdot 1{,}007276 + 7 \cdot 1{,}008665 - 13{,}9992 = 0{,}1124\ \text{u}$$

$$E_e\,({}^{14}_{7}\text{N}) = \Delta m\,({}^{14}_{7}\text{N}) \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 0{,}1124\ \text{u} \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 104{,}7\ \text{MeV}$$

$$E_n\,({}^{14}_{7}\text{N}) = \frac{E_e}{A} = \frac{104{,}7}{14} = 7{,}48\ \text{MeV}$$

– Para el $({}^{15}_{7}\text{N})$:

$$\Delta m\,({}^{15}_{7}\text{N}) = 7 \cdot m_p + (15 - 7) \cdot m_n - m_{nuclear} =$$

$$= 7 \cdot 1{,}007276 + 8 \cdot 1{,}008665 - 14{,}9963 = 0{,}1239\ \text{u}$$

$$E_e\,({}^{15}_{7}\text{N}) = \Delta m\,({}^{15}_{7}\text{N}) \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 0{,}1239 \cdot 931{,}5 = 115{,}4\ \text{MeV}$$

$$E_n\,({}^{15}_{7}\text{N}) = \frac{E_e}{A} = \frac{115{,}4}{15} = 7{,}69\ \text{MeV}$$

Por tanto, será más estable el nitrógeno-15, ya que su energía de enlace por nucleón es mayor.

**29** **La reacción siguiente permitió a Chadwick descubrir el neutrón:**

$$ {}^{9}_{4}\text{Be} + {}^{4}_{2}\text{He} \rightarrow {}^{12}_{6}\text{C} + {}^{1}_{0}n$$

**Calcula:**

**a) La energía desprendida en dicha reacción.**

**b) La velocidad del neutrón si toda esa energía aparece como energía cinética del neutrón.**

a) Del defecto másico de la reacción deducimos la energía desprendida en el proceso. Para calcularlo, podemos utilizar las masas atómicas porque el número de electrones es igual a ambos lados de la ecuación:

$$\Delta m = m\,({}^{9}_{4}\text{Be}) + m\,({}^{4}_{2}\text{He}) - m\,({}^{12}_{6}\text{C}) - m\,({}^{1}_{0}n)$$

$$\Delta m = 9{,}01218 + 4{,}002603 - 12{,}00000 - 1{,}008665 = 0{,}006118\ \text{u}$$

El equivalente energético de la masa obtenida es la energía desprendida en el proceso:

$$\Delta E = \Delta m \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 0{,}006118\ \text{u} \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 5{,}699\ \text{MeV}$$

En unidades del SI, esta energía vale:

$$\Delta E = 5{,}699 \cdot 10^{6}\ \text{eV} \cdot \frac{1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J}}{1\ \text{eV}} = 9{,}13 \cdot 10^{-13}\ \text{J}$$

b) De la expresión de la energía cinética despejamos la velocidad que adquiere el neutrón:

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \rightarrow v = \sqrt{\frac{2 \cdot E}{m}}$$

Teniendo en cuenta el valor de la masa del neutrón, en unidades del SI:

$$m = 1{,}008665\ \text{u} \cdot 1{,}66054 \cdot 10^{-27}\ \text{kg/u} = 1{,}6749 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$$

La velocidad del neutrón, imponiendo que toda la energía desprendida en la reacción se transforma en energía cinética del neutrón, resulta:

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot 9{,}13 \cdot 10^{-13}}{1{,}6749 \cdot 10^{-27}}} = 3{,}3 \cdot 10^{7}\ \text{m/s}$$

**30** **Calcula el defecto de masa y la energía que se desprende en las reacciones nucleares siguientes:**

**a)** $ {}^{3}_{1}\text{N} \rightarrow {}^{3}_{2}\text{He} + {}^{0}_{-1}e$ **b)** $ {}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^{4}_{2}\text{He}$

a) Para calcular el defecto de masa del proceso, en este caso, es necesario utilizar los valores de las masas nucleares, ya que se trata de una desintegración $\beta^-$ en la que un neutrón del núcleo se transforma en un protón y en un electrón (y un antineutrino):

$$m_{nuclear}\,({}^{3}_{1}\text{H}) = m\,({}^{3}_{1}\text{H}) - m_e = 3{,}016049 - 5{,}486 \cdot 10^{-4} = 3{,}015500\ \text{u}$$

$$m_{nuclear}\,({}^{3}_{12}\text{He}) = m\,({}^{3}_{2}\text{He}) - 2 \cdot m_e = 3{,}016049 - 2 \cdot 5{,}486 \cdot 10^{-4} = 3{,}014932\ \text{u}$$

Así, el defecto de masa resulta:

$$\Delta m = m\,({}^{3}_{1}\text{H}) - m\,({}^{3}_{2}\text{He}) - m\,({}^{\;0}_{-1}e)$$

$$\Delta m = 3{,}016049 - 3{,}014932 - 5{,}486 \cdot 10^{-5} = 1{,}94 \cdot 10^{-4}\ \text{u}$$

La energía desprendida en el proceso es:

$$\Delta E = \Delta m \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 1{,}94 \cdot 10^{-5}\ \text{u} \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 0{,}01807\ \text{MeV}$$

Que en unidades del S.I. vale:

$$\Delta E = 1{,}807 \cdot 10^{4}\ \text{eV} \cdot \frac{1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J}}{1\ \text{eV}} = 2{,}89 \cdot 10^{-15}\ \text{J}$$

b) En este caso, sí podemos trabajar con las masas atómicas, ya que el número de electrones se conserva. El defecto de masa resulta:

$$\Delta m = m\,({}^{226}_{88}\text{Ra}) - m\,({}^{222}_{86}\text{Rn}) - m\,({}^{4}_{2}\text{He})$$

$$\Delta m = 226{,}025403 - 222{,}017571 - 4{,}002603 = 5{,}229 \cdot 10^{-3}\ \text{u}$$

La energía desprendida vale:

$$\Delta E = \Delta m \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 5{,}229 \cdot 10^{-3}\ \text{u} \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 4{,}87\ \text{MeV}$$

Y expresada en unidades del SI:

$$\Delta E = 4{,}87 \cdot 10^{6}\ \text{eV} \cdot \frac{1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J}}{1\ \text{eV}} = 7{,}8 \cdot 10^{-13}\ \text{J}$$

## Reacciones nucleares. Fisión y fusión

**31** **Explica qué es la fisión y la fusión nuclear, y por qué se libera energía en dichos procesos.**

La fisión es un proceso nuclear en el que un núcleo pesado se divide en dos más ligeros de tamaño comparable. Los núcleos que se obtienen tienen una energía de enlace por nucleón mayor que el núcleo de partida, lo que justifica el desprendimiento de energía que acompaña al proceso.

Lo contrario sucede en la fusión, ya que en este proceso se unen dos núcleos ligeros para dar uno más pesado. El núcleo resultante en este caso también tiene mayor energía de enlace por nucleón que los núcleos de partida, y de ahí proviene la razón de que en este proceso también se libere energía.

**32** **¿Qué papel desempeñan las sustancias moderadoras y la absorbente que se encuentran junto al uranio enriquecido en un reactor de fisión?**

El uranio enriquecido es uranio-238 mezclado con una pequeña cantidad del isótopo uranio-235 (en torno a un 3 %), que hace que la reacción se mantenga a lo largo del tiempo.

El moderador reduce la velocidad de los neutrones hasta valores óptimos para que produzcan la fisión de los núcleos de uranio-235.

El absorbente elimina algunos de los neutrones liberados para que el número de fisiones se mantenga dentro de los límites deseados.

**33** **Calcula la energía que se obtiene al fisionar 1 kg de uranio-235, expresando el resultado en MeV y en J, según la reacción siguiente:**

$$^{235}_{92}\text{U} + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{141}_{56}\text{Ba} + ^{92}_{36}\text{Kr} + 3\,^{1}_{0}n$$

El defecto de masa del proceso es:

$$\Delta m = m\,(^{235}_{92}\text{U}) + m\,(^{1}_{0}n) - m\,(^{141}_{56}\text{Ba}) - m\,(^{92}_{36}\text{Kr}) - 3 \cdot m\,(^{1}_{0}n)$$

$$\Delta m = 235{,}0439 + 1{,}008665 - 140{,}9140 - 91{,}9250 - 3 \cdot 1{,}008665 = 0{,}1876\ \text{u}$$

La energía desprendida en la reacción es:

$$\Delta E = \Delta m \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 0{,}1876\ \text{u} \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 174{,}75\ \text{MeV}$$

Que, expresada en unidades del SI, es:

$$\Delta E = 1{,}7475 \cdot 10^{8}\ \text{eV} \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J/eV} = 2{,}799 \cdot 10^{-11}\ \text{J}$$

Esta es la energía desprendida en la reacción de fisión de un núcleo de uranio-235, pero en un kilogramo de esta sustancia el número de núcleos presentes es:

$$N = \frac{m}{M} \cdot N_A = \frac{1000\ \text{g}}{235{,}0439\ \text{g/mol}} \cdot 6{,}022 \cdot 10^{23}\ \text{átomos/mol} = 2{,}56 \cdot 10^{24}\ \text{átomos}$$

Por tanto, la energía obtenida de 1 kg de uranio es:

$$E_{total} = N \cdot \Delta E = 2{,}56 \cdot 10^{24} \cdot 174{,}75 = 4{,}47 \cdot 10^{26}\ \text{MeV}$$

Que, en unidades del SI, vale:

$$E_{total} = 4{,}47 \cdot 10^{26}\ \text{MeV} \cdot \frac{1{,}602 \cdot 10^{-13}\ \text{J}}{1\ \text{MeV}} = 7{,}16 \cdot 10^{13}\ \text{J}$$

**34** **Calcula la energía liberada en la fisión de 1 g de uranio-235, según la reacción:**

$$^{235}_{92}\text{U} + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{140}_{54}\text{Xe} + ^{94}_{38}\text{Sr} + 3\,^{1}_{0}n$$

**¿Qué cantidad de uranio se consume por segundo en un reactor nuclear de $P$ = 900 MW que funcione según dicha reacción? Calcula la cantidad de gasolina que se ha de quemar cada segundo para producir la misma cantidad de energía.**

**Dato: calor de combustión de la gasolina: 41 000 kJ/kg.**

Calculamos, en primer lugar, el defecto de masa del proceso:

$$\Delta m = m\,(^{235}_{92}\text{U}) + m\,(^{1}_{0}n) - m\,(^{140}_{54}\text{Xe}) - m\,(^{94}_{38}\text{Sr}) - 2 \cdot m\,(^{1}_{0}n)$$

$$\Delta m = 235{,}0439 + 1{,}008665 - 139{,}9216 - 93{,}9154 - 2 \cdot 1{,}008665 = 0{,}1982\ \text{u}$$

Y de aquí obtenemos la energía desprendida en la reacción:

$$\Delta E = \Delta m \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 0{,}1982\ \text{u} \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 184{,}62\ \text{MeV}$$

Que, expresada en unidades del SI, es:

$$\Delta E = 1{,}8462 \cdot 10^{8}\ \text{eV} \cdot 1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J/eV} = 2{,}958 \cdot 10^{-11}\ \text{J}$$

En 1 g de uranio-235 tenemos:

$$N = \frac{m}{M} \cdot N_A = \frac{1\ \text{g}}{235{,}0439\ \text{g/mol}} \cdot 6{,}022 \cdot 10^{23}\ \text{átomos/mol} = 2{,}56 \cdot 10^{21}\ \text{átomos}$$

Luego, la energía obtenida de 1 g de uranio es:

$$E_{1\,g} = N \cdot \Delta E = 2{,}56 \cdot 10^{21} \cdot 2{,}958 \cdot 10^{-11} = 7{,}572 \cdot 10^{10}\ \text{J}$$

Por otra parte, en el reactor ($P$ = 900 MW) se genera, cada segundo, una energía:

$$E = P \cdot t = 9 \cdot 10^{8}\ \text{W} \cdot 1\ \text{s} = 9 \cdot 10^{8}\ \text{J}$$

Por lo que la masa de uranio que se consume cada segundo en el generador será:

$$m_{uranio} = \frac{E}{E_{1\,g}} = \frac{9 \cdot 10^8 \text{ J}}{7,572 \cdot 10^{10} \text{ J/g}} = 11,89 \text{ g de uranio-235}$$

Si deseamos obtener la misma energía a partir de la combustión de la gasolina, deberemos quemar una masa:

$$m_{gasolina} = \frac{E}{E_{1\,g}} = \frac{9 \cdot 10^8 \text{ J}}{41 \cdot 10^6 \text{ J/kg}} = 21,95 \text{ kg de gasolina}$$

Como vemos, se trata de una masa aproximadamente 1 850 veces mayor.

**35** **Calcula cuánta energía se libera por átomo en la reacción de fusión $^1H + {}^3H \rightarrow {}^4He$.**

Calculamos el defecto másico de la reacción con las masas atómicas del protio, del tritio y del helio-4:

$$\Delta m = m\,(^1H) + m\,(^3H) - m\,(^4He) = 1,007825 + 3,016049 - 4,002603 = 0,021271 \text{ u}$$

La energía desprendida es:

$$\Delta E = \Delta m \cdot 931,5 \text{ MeV/u} = 0,021271 \text{ u} \cdot 931,5 \text{ MeV/u} = 19,81 \text{ MeV}$$

**36** **El isótopo de fósforo, $^{32}_{15}P$, de masa 31,9739 u y $t_{1/2}$ = 14,28 días, se transforma por emisión β en cierto isótopo estable de azufre (*Z* = 16), de masa 31,9721 u. En el proceso se libera energía en forma de radiación electromagnética:**

**a) Escribe la reacción nuclear y el tipo de desintegración beta producido. Calcula la energía y la frecuencia de la radiación emitida.**

**b) Calcula la fracción de átomos de fósforo desintegrados al cabo de 48 horas para una muestra formada inicialmente solo por átomos de fósforo $^{32}_{15}P$.**

a) Se trata de la emisión $\beta^-$, que es una emisión de electrones. Como en el núcleo no hay electrones, previamente debe haber una transformación de un neutrón en un protón más un electrón.

Así, cuando un núcleo emite un electrón, se transforma en otro núcleo con una unidad más de número atómico y el mismo número másico.

En el caso de los isótopos del fósforo y del azufre, la reacción nuclear es:

$$^{32}_{15}P \rightarrow {}^{32}_{16}S + {}^{0}_{-1}\beta + \gamma$$

Para calcular el defecto de masa, calculamos previamente la masa nuclear de cada nucleido. Para el fósforo-32, tenemos:

$$m_{nuclear}\,(^{32}_{15}P) = m\,(^{32}_{15}P) - 15 \cdot m_e = 31,9721 - 15 \cdot 5,486 \cdot 10^{-4} = 31,9657 \text{ u}$$

Y para el azufre-32:

$$m_{nuclear}\,(^{32}_{16}S) = m\,(^{32}_{16}S) - 16 \cdot m_e = 31,9721 - 16 \cdot 5,486 \cdot 10^{-4} = 31,9633 \text{ u}$$

Así, el defecto de masa resulta:

$$\Delta m = m_{nuclear}\,(^{32}_{15}P) - m_{nuclear}\,(^{32}_{16}S) - m\,(^{0}_{-1}e) = 31,9657 - 31,9633 - 5,486 \cdot 10^{-4}$$

$$\Delta m = 1,85 \cdot 10^{-3} \text{ u}$$

Que en unidades del SI vale:

$$\Delta m = 1,85 \cdot 10^{-3} \text{ u} \cdot \frac{1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{1 \text{ u}} = 3,07 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$$

La energía liberada en el proceso será, entonces:

$$E = \Delta m \cdot c^2 = 3,07 \cdot 10^{-30} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 2,76 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

Suponiendo que toda la energía sea liberada en forma de un fotón (radiación gamma), la relación entre la energía de ese fotón y su frecuencia es:

$$E = h \cdot f$$

Despejando la frecuencia, $f$, y sustituyendo valores:

$$f = \frac{E}{h} = \frac{2{,}76 \cdot 10^{-13}}{6{,}63 \cdot 10^{-34}} = 4{,}16 \cdot 10^{20}\ \text{Hz}$$

b) La expresión de la ley de la desintegración radiactiva es:

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

donde $N$ es el número de núcleos radiactivos presentes en la muestra en un instante $t$; $N_0$, el número de núcleos radiactivos iniciales, y $\lambda$, la constante de desintegración radiactiva.

A partir del dato del período de semidesintegración, se puede calcular el valor de la constante $\lambda$:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{0{,}693}{14{,}28} = 4{,}85 \cdot 10^{-2}\ \text{d}^{-1}$$

Sustituyendo valores en la ecuación de desintegración:

$$N = N_0 \cdot e^{-4{,}85 \cdot 10^{-2} \cdot 2} = 0{,}908 \cdot N_0$$

Por tanto, quedan sin desintegrar el 90,8 % de los átomos, y se desintegraron el 9,2 %.

**37 Si una central eléctrica se basase en la reacción $^2H + {}^2H \rightarrow {}^4He$ y tuviese un rendimiento del 55 %, ¿cuánto deuterio consumiría al día si 900 MW?**

En primer lugar, calculamos la energía desprendida en la reacción a partir del defecto de masa:

$$\Delta m = m\,(^2H) + m\,(^2H) - m\,(^4He) = 2 \cdot 2{,}014101 - 4{,}002603 = 0{,}0256\ \text{u}$$

Por tanto, la energía desprendida es:

$$\Delta E = \Delta m \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 0{,}0256\ \text{u} \cdot 931{,}5\ \text{MeV/u} = 23{,}85\ \text{MeV}$$

Su valor, en la unidad correspondiente del SI, es:

$$\Delta E = 23{,}85 \cdot 10^6\ \text{eV} \cdot \frac{1{,}602 \cdot 10^{-19}\ \text{J}}{1\,\text{eV}} = 3{,}82 \cdot 10^{-12}\ \text{J}$$

Que el rendimiento sea del 55 % nos indica que la energía que se aprovecha en cada reacción es:

$$E_{útil} = 0{,}55 \cdot \Delta E = 0{,}55 \cdot 3{,}82 \cdot 10^{-12}\ \text{J} = 2{,}10 \cdot 10^{-12}\ \text{J}$$

Como la energía que genera la central en un día es:

$$E_{generada} = P \cdot t = 9 \cdot 10^8\ \text{W} \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60\ \text{s} = 7{,}776 \cdot 10^{13}\ \text{J}$$

el número de reacciones que tienen lugar para producir esta energía es:

$$N_{reacc.} = \frac{E_{generada}}{E_{útil}} = \frac{7{,}776 \cdot 10^{13}\ \text{J}}{2{,}10 \cdot 10^{-12}\ \text{J}} = 3{,}703 \cdot 10^{25}\ \text{reacciones}$$

Y como en cada reacción intervienen dos núcleos de deuterio, el número de átomos de deuterio que se consumirán será el doble que el número de reacciones:

$$N = 2 \cdot N_{reacc.} = 2 \cdot 3{,}703 \cdot 10^{25} = 7{,}406 \cdot 10^{25}\ \text{átomos de deuterio}$$

Finalmente, teniendo en cuenta la masa atómica el deuterio, la masa que se consumirá en un día en la central será:

$$m = \frac{N}{N_A} \cdot M = \frac{7,406 \cdot 10^{25} \text{ átomos}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ átomos/mol}} \cdot 2,014101 \text{ g/mol} = 247,7 \text{ g de deuterio}$$

**38** **Calcula la energía que se libera en la siguiente reacción de fusión nuclear:**

$$^{2}_{1}\text{H} + ^{2}_{1}\text{H} \rightarrow ^{3}_{1}\text{H} + ^{1}_{1}\text{H}$$

**Expresa el resultado en J y en MeV.**

El defecto de masa correspondiente a este proceso es:

$$\Delta m = m\,(^{2}\text{H}) + m\,(^{2}\text{H}) - m\,(^{3}\text{H}) - m\,(^{1}\text{H})$$

$$\Delta m = 2 \cdot 2,014101 - 3,016049 - 1,007825 = 4,328 \cdot 10^{-3} \text{ u}$$

Por tanto, la energía desprendida es:

$$\Delta E = \Delta m \cdot 931,5 \text{ MeV/u} = 4,328 \cdot 10^{-3} \text{ u} \cdot 931,5 \text{ MeV/u} = 4,032 \text{ MeV}$$

Que, en unidades del SI, es:

$$\Delta E = 4,032 \cdot 10^{6} \text{ eV} \cdot \frac{1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} = 6,46 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

**Página 367**

# Efectos de la radiación

**39** **La radiación que absorbemos no solo proviene de fuentes artificiales. ¿Cuáles son las fuentes naturales radiactivas más importantes?**

Las fuentes naturales más importantes son:

- La radiación cósmica, formada por las partículas subatómicas y por la radiación electromagnética que llega a la Tierra desde el exterior.
- El aire que respiramos y los alimentos que ingerimos, incluyendo el agua.
- La materia que nos rodea, ya sea formando parte de construcciones o del suelo.

**40** **Enumera las principales aplicaciones de los isótopos radiactivos.**

Las aplicaciones más importantes son:

- Tratamiento de tumores cancerígenos.
- Análisis de muestras mediante el procedimiento denominado «activación neutrónica».
- Estudio de los órganos internos, en medicina, introduciendo en el cuerpo radioisótopos.
- Identificación de moléculas mediante protio.
- Esterilización de instrumentos quirúrgicos.
- Obtención de electricidad en las centrales nucleares de fisión.
- Irradiación de alimentos para eliminar gérmenes y ayudar a su conservación.
- Detectores de humo.
- Pararrayos (actualmente, en desuso).

# El modelo estandar de partículas

**41** **Cuando una partícula choca con su antipartícula, ambas desaparecen y se convierten en energía, normalmente en forma de fotones de alta energía (rayos $\gamma$). Si un protón colisiona con un antiprotón, tal como sucede en los grandes aceleradores de partículas, calcula cuánta energía se producirá a causa de su mutua aniquilación.**

**Dato: masa del protón, $m_p = 1{,}6726 \cdot 10^{-27}$ kg.**

Teniendo en cuenta que las masas del protón y del antiprotón son iguales, la cantidad de masa que se transforma en energía es:

$$\Delta m = 2 \cdot m_p = 2 \cdot 1{,}6726 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} = 3{,}3452 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}$$

Y la energía desprendida (ignorando las energías cinéticas de ambas partículas) es:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 = 3{,}3452 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} \cdot (3 \cdot 10^8\ \text{m/s})^2 = 3{,}011 \cdot 10^{10}\ \text{J}$$

**42** **Utilizando el modelo estándar, describe la estructura de un átomo y dónde se sitúan y cómo se agrupan las partículas elementales que lo componen.**

Según el modelo estándar, el átomo está constituido por tres tipos de partículas elementales: electrones, que se encuentran en la corteza atómica, y quarks *u* y *d*, en el núcleo. Los quarks se combinan para formar los protones y neutrones, que no son partículas elementales. En definitiva, tres partículas elementales (*e*, *u* y *d*) son las que conforman la estructura del átomo.

**43** **Corrige las afirmaciones que no sean correctas:**

**a) El protón está formado por dos quarks *down* y un quark *up*.**

**b) El gluon es la partícula transmisora de fuerza en la interacción electromagnética.**

**c) El neutrón está formado por dos quarks *up* y un quark *down*.**

**d) Las partículas mensajeras o transmisoras de fuerzas en la interacción nuclear fuerte son los bosones vectoriales $W^+$, $W^-$ y $Z^0$.**

a) Incorrecta. El protón está formado por dos quarks *up* y uno *down*.

b) Incorrecta. El gluon transmite la fuerza nuclear.

c) Incorrecta. El neutrón está formado por dos quarks *down* y uno *up*.

d) Incorrecta. Esas son las partículas transmisoras de la interacción nuclear débil.