15 Introducción a la física nuclear

EJERCICIOS PROPUESTOS

15.1 Ordena los tipos de radiactividad natural.

a) En orden creciente a su poder penetrante.

b) En orden creciente a su poder ionizante.

a) $\gamma > \beta > \alpha$

b) $\gamma < \beta < \alpha$

15.2 Busca información sobre el descubrimiento de la radiactividad en la dirección de internet:

www.e-sm.net/f2bach63

En esta dirección se pueden leer cosas tan interesantes como que los Curie midieron el calor asociado con la desintegración del radio y establecieron que 1 gramo de radio desprende unos 420 Julios (100 calorías) de energía por hora. Este efecto de calentamiento continúa hora tras hora y año tras año, mientras que la combustión completa de 1 gramo de carbón produce un total de 34 000 julios (8000 calorías) de energía.

15.3 Estima el tamaño de un núcleo de helio (A = 4) y de un núcleo de uranio (A = 236) y compara el volumen de ambos núcleos.

Utilizando la fórmula de Rutherford $R = R_0 A^{1/3}$, siendo $R_0 \approx 1,2 \cdot 10^{-15}$ m, se obtiene:

$$R_{He} = 1,2 \cdot 10^{-15} \cdot 4^{\frac{1}{3}} = 1,9 \cdot 10^{-15} \text{ m} ; \; R_U = 1,2 \cdot 10^{-15} \cdot 236^{\frac{1}{3}} = 7,4 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

Utilizando esta fórmula, como el volumen es proporcional al cubo del radio:

$$\frac{V_U}{V_{He}} = \frac{7,4^3}{1,9^3} = 59$$

15.4 Señala los principales procesos físicos implicados en los tres tipos de emisiones radiactivas naturales.

Emisión α. Las partículas α escapan de un núcleo pesado venciendo una "barrera de potencial" de unos 25 MeV producida por las fuerzas nucleares de atracción por efecto túnel.

Emisión β. El núcleo emite un electrón. Esto supone la conversión de un neutrón en un protón y un electrón que abandona el núcleo inmediatamente después de crearse.

Emisión γ. El paso de los núcleos desde estados excitados a su estado fundamental conlleva la emisión de fotones muy energéticos (entre 2 y 3 MeV) que se denominan rayos gamma.

15.5 Se tiene una muestra inicial de $2,0 \cdot 10^{15}$ núcleos de polonio-210 con un período de semidesintegración de 138 días.

a) ¿Cuánto vale la constante radiactiva del polonio?

b) ¿Cuál será su actividad inicial y al cabo de 1000 días?

a) La relación entre la constante de desintegración y la semivida es:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{\ln 2}{138} = 0,00502 \text{ día}^{-1} = \frac{0,00502}{24 \cdot 3600} = 5,81 \cdot 10^{-8} \text{ s}^{-1}$$

b) Su actividad inicial es $\lambda \cdot N_0 = 5,81 \cdot 10^{-8} \cdot 2,0 \cdot 10^{15} = 1,16 \cdot 10^8$ Bq

Al cabo de 1000 días, la muestra tendrá: $N = N_0 e^{-\lambda t} = 2,0 \cdot 10^{15} \cdot e^{-0,00502 \cdot 1000} = 1,32 \cdot 10^{13}$ núcleos

Su actividad en ese momento será: $\lambda \cdot N = 5,81 \cdot 10^{-8} \cdot 1,32 \cdot 10^{13} = 7,67 \cdot 10^5$ Bq

15.6 Indica razonadamente por qué es necesario establecer la existencia de las fuerzas nucleares. Señala tres de sus principales características.

Si no existiesen fuerzas nucleares de atracción entre los nucleones, la repulsión electrostática entre los protones disgregaría el núcleo. Tres características de estas fuerzas nucleares son:

- Son de atracción y unas 100 veces más intensas que las electromagnéticas. Sin embargo, para distancias menores al tamaño de los protones y neutrones son repulsivas.
- Tienen muy corto alcance y son prácticamente nulas a distancias mayores de 10^{-15} m.
- Son saturadas, es decir, cada nucleón está ligado solo a un número determinado de otros nucleones y no a todos los existentes en el núcleo.

15.7 Indica la relación entre el defecto de masa de un núcleo y su energía de enlace. Relaciona esta última con la estabilidad del núcleo.

La energía de enlace o energía de ligadura del núcleo, ΔE, es la energía que corresponde al defecto de masa, Δm. Esta energía, $\Delta E = \Delta m\, c^2$, se desprende en el proceso de formación del núcleo a partir de sus componentes y estabiliza el núcleo. A mayor energía de enlace por nucleón, más estable será un núcleo.

15.8 Un núcleo de $^{235}_{92}U$ posee una masa relativa experimental de 235,04393 u. Determina:

a) El defecto de masa del núcleo.

b) La energía de enlace.

a) $\Delta m = Z\, m_p + (A - Z)\, m_n - M_{exp}$, donde M_{exp} es la masa experimental del núcleo considerado.

Tomando: $m_p = 1{,}00728$ u $= 1{,}67262 \cdot 10^{-27}$ kg y $m_n = 1{,}00867$ u $= 1{,}67493 \cdot 10^{-27}$ kg

$$\Delta m = 92 \cdot 1{,}00728 + (235 - 92) \cdot 1{,}00867 - 235{,}04393 = 1{,}86564 \text{ u}$$

$$\Delta m = 1{,}66053 \cdot 10^{-27} \text{ (kg u}^{-1}) \cdot 1{,}86564 \text{ (u)} = 3{,}09795 \cdot 10^{-27} \text{kg}$$

b) $\Delta E = \Delta m\, c^2 = 3{,}09795 \cdot 10^{-27} \cdot (3{,}00 \cdot 10^8)^2 = 2{,}79 \cdot 10^{-10}$ J

15.9 Explica, dentro del modelo de la gota líquida, qué factores contribuyen a la energía de ligadura del núcleo.

La energía de enlace del núcleo se expresa como suma de tres contribuciones:

La energía de volumen, E_v, positiva, favorable a la formación del núcleo, debida a las fuerzas nucleares, que son directamente proporcionales a su número de partículas o número másico, *A*. Se denomina de volumen porque el volumen atómico también es proporcional al número másico:

$$E_v = a_v\, A$$

La energía superficial, E_s, negativa, que corrige el valor de E_v, debida a que los nucleones de la superficie tienen menos nucleones alrededor. Este hecho es responsable de que el núcleo experimente el mismo efecto de tensión superficial que la gota líquida y, en ausencia de fuerzas exteriores, presente forma esférica.

$$E_s = -a_s\, A^{2/3}$$

Una energía de repulsión electrostática, E_c, negativa porque se opone a la formación del núcleo. Si el núcleo posee *Z* protones, existirán $\frac{Z\,(Z-1)}{2}$ pares de protones. La energía electrostática es directamente proporcional al número de estos pares e inversamente proporcional al radio del núcleo ($R = R_0\, A^{1/2}$):

$$E_c = -\frac{a_c\, Z(Z-1)}{A^{1/3}}$$

15.10 Aproxima, mediante el modelo de la gota líquida, la energía de enlace de un núcleo de $^{242}_{94}Pu$.

Calculando la energía de enlace en MeV, los valores de las constantes son: a_v = 14,1; a_s = 13,1 y a_c = 0,585

Por tanto:

$$E = 14{,}1A - 13{,}1A^{2/3} - \frac{0{,}585\,Z(Z-1)}{A^{1/3}}\ \ (\text{MeV})$$

$$E = 14{,}1 \cdot 242 - 13{,}1 \cdot 242^{2/3} - \frac{0{,}585 \cdot 94 \cdot 93}{242^{1/3}} = 2083\ \text{MeV}$$

15.11 Dentro del modelo nuclear de capas, indica el significado de los denominados "números mágicos" y explica razonadamente su existencia.

Se ha comprobado experimentalmente que los núcleos con 2, 8, 20, 28, 50, 82 y 126 nucleones son particularmente estables y más abundantes en la naturaleza que los núcleos que poseen números másicos próximos. Estos números másicos, denominados "números mágicos", pueden justificarse mediante la teoría cuántica.

Los nucleones se sitúan en capas sucesivas de energía creciente, donde caben un máximo de 2, 6, 12, 8, 22, 32, 44… nucleones. Se observa que la suma de los nucleones de los niveles llenos coincide con núcleos con un número de nucleones igual a los "números mágicos":

2

2 + 6 = 8

2 + 6 + 12 = 20

2 + 6 + 12 + 8 = 28

2 + 6 + 12 + 8 + 22 = 50

……………………………..

15.12 Señala las principales diferencias entre el modelo de la gota líquida y el modelo de capas sobre el núcleo atómico.

El modelo nuclear de capas, propuesto en 1948 por la física polaca M. Goeppert-Mayer, postula que cada nucleón interacciona con el campo de fuerzas creado por el resto de nucleones. Se aparta así del modelo de la gota líquida, que supone que cada nucleón solo interacciona con las partículas más próximas.

15.13 Explica por qué los neutrones son las partículas ideales para romper núcleos.

Al carecer de carga eléctrica, no tienen que vencer la barrera de Coulomb. Dentro de los neutrones, lo denominados térmicos, con menos energía, permanecen más tiempo junto al núcleo y tienen más posibilidades de ser capturados por este.

15.14 La reacción global de fusión que se produce en el Sol es $4\ ^1_1H \rightarrow {}^4_2He + 2\ {}^{0}_{+1}e + 25{,}7\ \text{MeV}$. Sabiendo que el Sol radia una energía de 2,78 · 10^{31} J día^{-1}, averigua cuánta masa pierde diariamente por ese hecho.

Para cualquier reacción nuclear, la pérdida de masa se convierte totalmente en energía radiada.

Se sabe 1 u = 1,66053 · 10^{-27} kg $\Leftrightarrow$ E = $\Delta m\, c^2$ = 1,66053 · 10^{-27} · (3,00 · $10^8)^2$ = 1,49 · 10^{-10} J

En el Sol están desapareciendo: $2{,}78 \cdot 10^{31}\,(\text{J día}^{-1}) \cdot \dfrac{1(\text{u})}{1{,}49 \cdot 10^{-10}\,(\text{J})} \cdot \dfrac{1{,}66 \cdot 10^{-27}\,(\text{kg})}{1(\text{u})} = 3{,}10 \cdot 10^{14}\ \text{kg día}^{-1}$

15.15 Señala algunas ventajas e inconvenientes de los reactores nucleares de fisión.

Ventajas: tienen una tecnología ya desarrollada; no hay emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera; la cantidad de combustible nuclear consumida es muy pequeña.

Inconvenientes: el problema de los residuos radiactivos no está resuelto; los costes de construcción de las centrales son muy elevados.

15.16 Un reactor nuclear de fisión tiene una potencia térmica de 1000 MW. Calcula la masa de U-235 que transforma en energía por segundo suponiendo un rendimiento del 100%.

La reacción de fisión del uranio es: ${}^{235}_{92}U + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{144}_{56}Ba + {}^{89}_{36}Kr + 3\,{}^{1}_{0}n + 200\ \text{MeV}$

La energía por cada fisión es:

$$200\,(\text{MeV})\cdot 10^{6}\left(\frac{\text{eV}}{\text{MeV}}\right)\cdot 1{,}60\cdot 10^{-19}\left(\frac{\text{J}}{\text{eV}}\right) = 3{,}20\cdot 10^{-11}\,\text{J}$$

En cada fisión, el defecto de masa es:

$$200\,\text{MeV} = 200\,(\text{MeV})\cdot\frac{1(\text{u})}{931{,}5\,(\text{MeV})}\cdot\frac{1{,}66\cdot 10^{-27}(\text{kg})}{1(\text{u})} = 3{,}56\cdot 10^{-28}\text{kg}$$

En cada segundo el reactor produce 10^{9} J que corresponden a:

$$10^{9}(\text{J})\cdot\frac{1(\text{fisión})}{3{,}20\cdot 10^{-11}(\text{J})} = 3{,}12\cdot 10^{19}\,\text{fisiones}$$

La masa transformada en energía por segundo en el reactor nuclear es:

$$3{,}65\cdot 10^{-28}(\text{kg fisión}^{-1})\cdot 3{,}12\cdot 10^{19}\ (\text{fisión}) = 1{,}14\cdot 10^{-8}\ \text{kg}$$

Otra forma de hacerlo sería analizar que la masa que desaparece se convierte plenamente en energía:

$$m = \frac{P\cdot t}{c^{2}} = \frac{10^{9}\cdot 1}{c^{2}} = 1{,}1\cdot 10^{-8}\ \text{kg}$$

15.17 Señala los posibles riesgos para la salud de las distintas radiaciones ionizantes clasificándolas por su peligrosidad.

El daño total potencial debido a la radiación ionizante se determina mediante la dosis equivalente. Es el producto de la dosis absorbida por un coeficiente llamado de eficacia biológica relativa (EBR) que depende del tipo de radiación. Para los rayos X de 250 kV, el EBR es 1, sin embargo, para los neutrones y partículas α, el EBR es 10. Una unidad habitual es el rem (1 rem = 0,01 J kg^{-1}), aunque en el SI se utiliza el sievert (Sv): 1 Sv = 100 rem.

Hoy día se sabe que los rayos gamma solo provocan lesiones en puntos concretos, de forma que el tejido vivo puede reparar las lesiones causadas. Por el contrario, las partículas alfa provocan grandes daños en áreas pequeñas y son más perjudiciales para el tejido vivo. Los neutrones también son muy peligrosos.

15.18 Busca información sobre la técnica de diagnóstico por imagen denominada PET en la dirección de internet:

www.e-sm.net/f2bach64

La tomografía por emisión de positrones (PET en inglés) es una técnica de diagnóstico no invasiva que permite realizar imágenes que muestran el metabolismo y el funcionamiento de tejidos y órganos.

15.19 Dentro del denominado modelo estándar de partículas, clasifica las partículas subatómicas por su espín y por su estructura.

Indica si su finalidad es transmitir fuerzas o formar la materia.

– Según su espín, las partículas pueden ser bosones y fermiones.

  Los bosones. Tienen espín entero (s = 0, 1, 2, 3…) y no cumplen el principio de exclusión de Pauli. Son las partículas que transmiten las fuerzas entre partículas constituyentes de la materia. Por ejemplo, el fotón tiene espín s = 0 y transmite la fuerza electromagnética entre partículas cargadas.

  Los fermiones. Tienen espín semientero (s = 1/2, 3/2…) y cumplen el principio de exclusión de Pauli. Son las partículas que constituyen la materia. El electrón, el protón y el neutrón son fermiones.

– Según su estructura, las partículas pueden ser leptones (auténticamente elementales) y hadrones (con estructura interna).

EJERCICIOS Y PROBLEMAS

RADIACTIVIDAD NATURAL Y DESINTEGRACIÓN RADIACTIVA

15.20 Determina el número atómico y el número másico del isótopo que resulta después que un nucleido $^{238}_{92}U$ emita sucesivamente dos partículas α y tres partículas β.

$$^{238}_{92}U \rightarrow ^{234}_{90}X_1 + \alpha \;\rightarrow\; ^{234}_{90}X_1 \rightarrow ^{230}_{88}X_2 + \alpha \rightarrow ^{230}_{88}X_2 \rightarrow ^{230}_{89}X_3 + \beta \rightarrow ^{230}_{89}X_3 \rightarrow ^{230}_{90}X_4 + \beta \rightarrow ^{230}_{90}X_4 \rightarrow ^{230}_{91}X_5 + \beta$$

Se produce Pa-230.

15.21 Un núcleo de un elemento químico $^{214}_{83}X$ que experimenta sucesivamente una emisión α, tres emisiones β y una emisión γ se transformará en el elemento:

a) $^{214}_{82}Y$ **b)** $^{210}_{84}Y$ **c)** $^{210}_{82}Y$

El número másico final será 210 y el número atómico 84. La contestación correcta es la b).

15.22 ¿Cómo es posibles que un núcleo emita una partícula α con una energía de 7 MeV si esta necesitaría al menos 20 MeV de energía para escapar del núcleo?

La emisión α se explica mediante el efecto túnel. Las partículas α escapan de los núcleos, así, sin necesidad de tener la energía de 20 MeV según un modelo clásico.

15.23 Se sitúa un detector de radiactividad frente a una muestra radiactiva que posee un período de semidesintegración de 60,0 s. En el instante t = 0 el detector marca una velocidad de desintegración de 2000 cuentas s^{-1}. Calcula:

a) La constante de desintegración λ.

b) La velocidad de desintegración al cabo de un minuto.

a) Aplicando la ecuación y sustituyendo: $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{\ln 2}{60{,}0} = 0{,}0116\ s^{-1}$

b) La actividad en general es: N λ. Por tanto, la actividad inicial será $N_0\,\lambda = 2000\ \text{Bq} \Rightarrow N_0 = \frac{2000}{\lambda}$ núcleos

El número de núcleos al cabo de 1 minuto es: $N = N_0 e^{-\lambda t} = \frac{2000}{\lambda} e^{-0{,}0116\cdot 60}$

Su actividad será: $\lambda N = 2000\, e^{-0{,}0116\cdot 60} = 1000$ cuentas s^{-1}

15.24 Explica cómo puede determinarse la edad de restos de un organismo prehistórico por el método del carbono-14. Aplica este método para hallar la antigüedad de una muestra de madera prehistórica cuya actividad radiactiva es diez veces inferior a la de una muestra de igual masa de madera moderna. Se sabe que el período de semidesintegración del $^{14}_{6}C$ es 5600 años.

Los seres vivos mantienen una cantidad constante de C-14 mientras viven. Como este elemento es radiactivo, una vez que el ser muere, su cantidad disminuye conforme a la ley de la desintegración, y según la cantidad que quede, se puede saber la antigüedad de unos restos.

Como $t_{1/2}$ = 5600 años = 1,8· 10^{11} s, $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{\ln 2}{1{,}8\cdot 10^{11}} = 3{,}9\cdot 10^{-12} s^{-1}$

La cantidad de núcleos de una muestra es proporcional a su actividad, por tanto:

$$N = \frac{N_0}{10} \Rightarrow \frac{N_0}{10} = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow 0{,}1 = e^{-3{,}9\cdot 10^{-12} t} \Rightarrow \ln 0{,}1 = -\,3{,}9\cdot 10^{-12}\, t \Rightarrow t = 5{,}9\cdot 10^{11}\ s \approx 19\,000 \text{ años}$$

15.25 Una muestra de ^{222}Rn contiene inicialmente 1,00 · 10^{12} átomos de este isótopo radiactivo, cuya semivida es de 3,28 días.

a) Calcula la actividad inicial de la muestra.

b) Determina los átomos que quedarán sin desintegrar después de 10 días.

c) ¿Cuál es su actividad expresada en becquerels en ese momento?

a) $\lambda = \frac{\ln 2}{3{,}28} = 0{,}211\,\text{dia}^{-1} = 2{,}44 \cdot 10^{-6}\,s^{-1}$

Actividad inicial: $\lambda N_0 = 2{,}44 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}00 \cdot 10^{12} = 2{,}44 \cdot 10^{6}\,Bq$

b) Tras 10 días, quedan sin desintegrar: $N = N_0 e^{-\lambda t} = 1{,}00 \cdot 10^{12}\, e^{-0{,}211 \cdot 10} = 1{,}21 \cdot 10^{11}$ núcleos

c) La actividad será: $\lambda N = 2{,}44 \cdot 10^{-6} \cdot 1{,}21 \cdot 10^{11} = 2{,}95 \cdot 10^{5}\,Bq$

15.26 El ^{131}I tiene un período de semidesintegración $t_{1/2}$ = 8,04 días. ¿Cuántos átomos de ^{131}I quedarán en una muestra que inicialmente tiene *N_0* átomos de este nucleido al cabo de 16,08 días? Considera los casos:

a) $N_0 = 10^{12}$ átomos.

b) N_0 = 2 átomos

Comenta los resultados.

La constante de desintegración del isótopo es: $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{\ln 2}{8{,}04} = 0{,}0862\,\text{día}^{-1}$

a) $N = N_0 e^{-\lambda t} = 1{,}00 \cdot 10^{12}\, e^{-0{,}0862 \cdot 16{,}08} = 2{,}50 \cdot 10^{11}$ átomos

b) Si aplicamos la fórmula se obtiene: $N = N_0 e^{-\lambda t} = 2\, e^{-0{,}0862 \cdot 16{,}08} = 0{,}50$ núcleos

Este resultado es imposible. La realidad es que la desintegración es un proceso estadístico y su ley solo es aplicable a grandes cantidades de núcleos. No se puede predecir cuándo se va a desintegrar un solo núcleo.

15.27 Disponemos de 100 g de ^{60}Co cuya constante de desintegración es 2,0 · 10^{-6} s^{-1}. Determina:

a) El tiempo que debe transcurrir para que la muestra de dicho nucleido se reduzca a 25 g.

b) La actividad inicial de la muestra en Bq.

Datos. M(Co) = 59,93 g, N_A = 6,02 · 10^{23}

a) La fórmula $N = N_0 e^{-\lambda t}$ se puede expresar con N y N_0 en átomos, moles o gramos. En este caso:

$$25 = 100\, e^{-2{,}0 \cdot 10^{-6} t} \Rightarrow \ln 25 = \ln 100 - 2{,}0 \cdot 10^{-6} t\,,\ t = \frac{\ln 25 - \ln 100}{-2{,}0 \cdot 10^{-6}} = 6{,}9 \cdot 10^{5}\,s$$

b) La masa molar del Co-60 es 59,93 g. A través de la masa molar, se pasan los gramos a moles y mediante el número de Avogadro se pasan a número de átomos:

$$\text{Actividad} = \lambda N = 2{,}0 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{100}{59{,}93} 6{,}02 \cdot 10^{23} = 2{,}0 \cdot 10^{18}\,Bq$$

15.28 El talio-201 es un isótopo radiactivo usado en medicina para la detección de anginas de pecho y prevención de infartos. Este nucleido posee un período de semidesintegración de 3 días y una masa molar de 201 g.

Suponiendo que a un paciente se le inyectan 0,0020 g de esta sustancia, determina:

a) El tiempo que tarda la muestra radiactiva en reducirse a 0,00010 g.

b) La actividad inicial de la muestra y la actividad que posee cuando quedan 0,0001 g.

a) La constante de desintegración radiactiva es:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{\ln 2}{3,00} = 0,231\,\text{día}^{-1} = 2,67 \cdot 10^{-6}\,\text{s}^{-1}$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow 0,0001 = 0,0020 \cdot e^{-0,231t} \Rightarrow \ln 0,0001 = \ln 0,002 - 0,231\,t \Rightarrow t = 13,0\,\text{días}$$

b) El número inicial de núcleos es: $N_0 = \frac{0,0020}{201} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 6,0 \cdot 10^{18}$ núcleos

Su actividad es: $\lambda N_0 = 2,67 \cdot 10^{-6} \cdot 6,0 \cdot 10^{18} = 1,6 \cdot 10^{13}\,\text{Bq}$

El número de núcleos final es: $N = \frac{0,00010}{201} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 3,0 \cdot 10^{17}$ núcleos

Su actividad es: $N = 2,67 \cdot 10^{-6} \cdot 3,0 \cdot 10^{17} = 8,0 \cdot 10^{11}\,\text{Bq}$

15.29 El rubidio-87 es un radioisótopo natural que se emplea en la datación de rocas y que se desintegra en estroncio-87 con un período de semidesintegración de 4,88 · 10^{10} años. Su masa molar es 86,99 g. Determina la actividad de una muestra de 4,00 · 10^{-6} g de rubidio-87 expresando el resultado en Bq y en Ci.

La constante de desintegración radiactiva es:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{4,88 \cdot 10^{10}} = 1,42 \cdot 10^{-11}\text{año}^{-1} = 4,50 \cdot 10^{-19}\text{s}^{-1}$$

La actividad será: $\lambda N = 4,50 \cdot 10^{-19}\, \frac{4,00 \cdot 10^{-6}}{86,99} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 0,0125\,\text{Bq}$

$$\lambda N = 0,0125\,\text{Bq} = \frac{0,0125\,(\text{Bq})}{3,7 \cdot 10^{10} (\text{Bq}\,\text{Ci}^{-1})} = 3,38 \cdot 10^{-13}\ \text{Ci}$$

15.30 ¿Qué proporción de núcleos de ^{115}Cd de una muestra se desintegran en 200 horas si el período de semidesintegración es 53,4 horas?

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = 0,0130\ \text{h}^{-1};\ N = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow \frac{N}{N_0} = e^{-0,0130 \cdot 200} = 0,0743$$

Tras 200 h, quedan el 7,43% de núcleos, luego se han desintegrado el 92,57% de los núcleos.

15.31 Una muestra radiactiva disminuye desde 10^{15} núcleos hasta 10^9 núcleos en 8 días. Calcula:

a) La constante λ y $t_{1/2}$.

b) La actividad de la muestra de 10^{15} núcleos transcurridos 20 días.

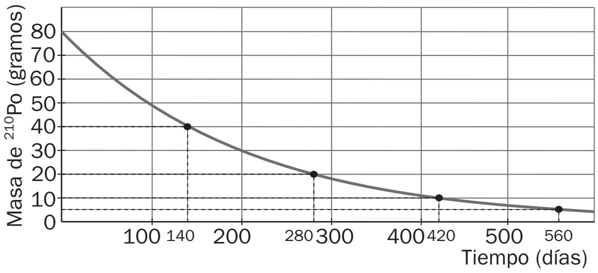
a) $N = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow \frac{10^9}{10^{15}} = e^{-\lambda \cdot 8};\ \ln\left(10^{-6}\right) = -8\lambda \Rightarrow \lambda = 1,7\ \text{día}^{-1} = 2,0 \cdot 10^{-5}\ \text{s}^{-1};\ t_{1/2} = \frac{\ln 2}{1,7} = 0,41\ \text{días}$

b) Tras 20 días, probablemente queden 1 ó 2 núcleos. $N = N_0 e^{-\lambda t} = 10^{15} \cdot e^{-1,7 \cdot 20} = 1,7$

La actividad, según la ecuación habitual, sería: $A = \lambda N = 2,0 \cdot 10^{-5} \cdot 1,7 = 3,4 \cdot 10^{-5}$ Bq

En realidad, esta actividad se refiere a la probabilidad de que se desintegren los núcleos que quedan y no a una actividad radiactiva sostenida.

15.32 La siguiente gráfica muestra la desintegración de una muestra de ^{210}Po .



a) Deduce su período de semidesintegración.

b) Calcula su constante radiactiva.

a) La muestra pasa de 80 g a 40 g en 140 días. Por tanto: $t_{1/2} = 140$ días

b) Utilizando el dato anterior, su constante radiactiva será: $\lambda = \dfrac{\ln 2}{t_{1/2}} = 0{,}00495\ \text{día}^{-1}$

ENERGÍA DE ENLACE Y DEFECTO DE MASA

15.33 Explica qué es el defecto de masa. En el caso de un núcleo del isótopo $^{15}_{7}$N :

a) Determina su defecto de masa.

b) Calcula su energía de enlace por nucleón.

Datos. m_p = 1,007276 u; m_n = 1,008665 u; M ($^{15}_{7}$N)= 15,0001089 u

El defecto de masa es la diferencia que hay entre la masa de un núcleo y la que tendrían sus partículas constituyentes por separado.

a) El defecto de masa del isótopo será:

$$\Delta m = Zm_p + (A-Z)m_n - M_{exp} = 7 \cdot 1{,}007276 + (15-7)\cdot 1{,}008665 - 15{,}0001089 = 0{,}120143\ \text{u}$$

$$0{,}120143\,(\text{u})\cdot 1{,}66\cdot 10^{-27}\,(\text{kg u}^{-1}) = 1{,}99\cdot 10^{-28}\ \text{kg}$$

b) La energía de enlace por nucleón será: $\dfrac{E}{A} = \dfrac{\Delta m c^2}{A} = \dfrac{1{,}99\cdot 10^{-28}(3{,}00\cdot 10^8)^2}{15} = 1{,}19\cdot 10^{-12}\ \text{J nucleón}^{-1}$

15.34 El $^{14}_{6}$C es un isótopo radiactivo del carbono utilizado para determinar la antigüedad de restos orgánicos. Calcula:

a) El defecto de masa del núcleo.

b) Su energía de ligadura media por nucleón en MeV nucleón^{-1}.

Datos. Masas atómicas (u): $^{1}_{0}$n = 1,0087; $^{1}_{1}$H = 1,0073; M $\left(^{14}_{6}\text{C}\right)$ = 14,0032; c = 3,00 · 10^8 m s^{-1};

1 u = 1,66 · 10^{-27} kg; e = 1,60 · 10^{-19} J

a) El defecto de masa es: $\Delta m = Zm_p + (A-Z)m_n - M_{exp}$

$$\Delta m = 6\cdot 1{,}0073 + (14-6)1{,}0087 - 14{,}0032 = 0{,}1102\ \text{u};\ \ 0{,}1102\,(\text{u})\cdot 1{,}66\cdot 10^{-27}(\text{kg u}^{-1}) = 1{,}829\cdot 10^{-28}\ \text{kg}$$

b) La energía de ligadura es: $E = \Delta m c^2 = 1{,}829\cdot 10^{-28}\cdot(3{,}00\cdot 10^8)^2 = 1{,}65\cdot 10^{-11}\ \text{J}$

En MeV será: $1{,}65\cdot 10^{-11}(\text{J})\cdot \dfrac{1\,(\text{eV})}{1{,}60\cdot 10^{-19}\,(\text{J})} = 1{,}03\cdot 10^8\ \text{eV} = 1{,}03\cdot 10^2\ \text{MeV}$

La energía de ligadura por nucleón será: $\dfrac{E}{A} = \dfrac{1{,}03\cdot 10^2}{14} = 7{,}36\ \text{MeV nucleón}^{-1}$

15.35 Las masas atómicas del $^{14}_{7}N$ y $^{15}_{7}N$ son 13,99922 u y 15,000109 u, respectivamente.

a) Determina la energía de enlace de ambos en eV.

b) Indica razonadamente cual de ellos es más estable.

Datos. m_p = 1,007276 u; m_n = 1,008665 u; c = 3,00 · 10^8 m s^{-1}; 1 u = 1,66 · 10^{-27} kg

a) Para el N-14:

$$\Delta m = Z m_p + (A - Z) m_n - M_{exp} = 7 \cdot 1{,}007276 + 7 \cdot 1{,}008665 - 13{,}99922 = 0{,}112367\,u$$

$$0{,}112367\,(u) \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}\,(kg\ u^{-1}) = 1{,}87 \cdot 10^{-28}\,kg\ ;\ E = \Delta m c^2 = 1{,}87 \cdot 10^{-28} \cdot (3{,}00 \cdot 10^8)^2 = 1{,}68 \cdot 10^{-11}\,J$$

Para el N-15:

$$\Delta m = Z m_p + (A - Z) m_n - M_{exp} = 7 \cdot 1{,}007276 + 8 \cdot 1{,}008665 - 15{,}000109 = 0{,}120143\,u$$

$$0{,}120143\,(u) \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}\,(kg\ u^{-1}) = 1{,}99 \cdot 10^{-28}\,kg\ ;\ E = \Delta m c^2 = 1{,}99 \cdot 10^{-28} \cdot (3{,}00 \cdot 10^8)^2 = 1{,}79 \cdot 10^{-11}\,J$$

b) La estabilidad se mide a través de la energía de enlace por nucleón:

$$N-14 \Rightarrow \frac{E}{A} = \frac{1{,}68 \cdot 10^{-11}}{14} = 1{,}20 \cdot 10^{-12}\,J$$

$$N-15 \Rightarrow \frac{E}{A} = \frac{1{,}79 \cdot 10^{-11}}{15} = 1{,}19 \cdot 10^{-12}$$

Es más estable el N-14.

15.36 El $^{239}_{94}Pu$ es un elemento que no existe libre en la naturaleza y que ha sido sintetizado a partir de $^{235}_{92}U$. Tiene aplicaciones bélicas y también se emplea como combustible en determinados reactores nucleares de fisión. Su masa atómica es 239,05433 u.

a) Determina su defecto de masa.

b) Calcula su energía de enlace y su energía de enlace por nucleón, en eV y en eV nucleón^{-1}. Realiza una predicción sobre la estabilidad de sus núcleos.

Tomando como datos. m_p = 1,00728 u; m_n = 1,00867 u; c = 3,00 · 10^8 m s^{-1}; 1 u = 1,66 · 10^{-27} kg

a) El defecto de masa será:

$$\Delta m = Z m_p + (A - Z) m_n - M_{exp} = 94 \cdot 1{,}00728 + 145 \cdot 1{,}00867 - 239{,}05433 = 1{,}88714\,u$$

$$1{,}88714\,(u) \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}\,(kg\ u^{-1}) = 3{,}13 \cdot 10^{-27}\,kg$$

b) La energía de enlace del núcleo será:

$$E = \Delta m c^2 = 3{,}13 \cdot 10^{-27} \cdot (3{,}00 \cdot 10^8)^2 = 2{,}82 \cdot 10^{-10}\,J$$

$$2{,}82 \cdot 10^{-10}\,(J) \cdot \frac{1(eV)}{1{,}60 \cdot 10^{-19}\,(J)} = 1{,}76 \cdot 10^9\ eV = 1{,}76 \cdot 10^3\ MeV$$

La energía por nucleón será:

$$\frac{E}{A} = \frac{1{,}76 \cdot 10^3}{239} = 7{,}36\ MeV\ nucleón^{-1}$$

Su energía de enlace por nucleón es pequeña; por tanto, la estabilidad del núcleo también lo es.

15.37 El $^{226}_{88}Ra$ se desintegra radiactivamente para dar $^{222}_{86}Rn$.

a) Indica el tipo de emisión radiactiva y escribe la ecuación de dicha reacción nuclear.

b) Calcula la energía liberada en el proceso.

Datos. $M\left(^{226}_{88}Ra\right) = 226{,}0960$ u; $M\left(^{222}_{86}Rn\right) = 222{,}0869$ u; $M\left(^{4}_{2}He\right) = 4{,}00387$ u; $c = 3{,}00 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}; 1 u = $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ kg

a) El núcleo del radio emite una partícula α, por lo que la reacción es:

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}He$$

b) El defecto de masa en esta reacción es:

$$\Delta m = M\left(^{226}_{88}Ra\right) - \left(M\left(^{222}_{86}Rn\right) + M\left(^{4}_{2}He\right)\right) = 226{,}0960 - (222{,}0869 + 4{,}00387) = 0{,}00523 \text{ u}$$

$$0{,}00523\,(u) \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}\,(kg\ u^{-1}) = 8{,}68 \cdot 10^{-30}\,kg$$

$$E = \Delta m c^2 = 8{,}68 \cdot 10^{-30} \cdot (3{,}00 \cdot 10^{8})^2 = 7{,}81 \cdot 10^{-13}\,J$$

15.38 Tras capturar un neutrón térmico, un núcleo de uranio-235 se fisiona en la forma:

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

a) Determina el defecto de masa que se produce en el proceso.

b) Calcula la energía liberada. Expresa el resultado en julios y en MeV.

Datos. $M\left(^{235}_{92}U\right) = 235{,}0439$ u; $M\left(^{141}_{56}Ba\right) = 140{,}914$ u; $M\left(^{92}_{36}Kr\right) = 91{,}9250$ u; $m_n = 1{,}0087$ u; $c = 3{,}00 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}; 1 u = $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ kg; e = $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ J

a) El defecto de masa será: $\Delta m = M\left(^{235}_{92}U\right) + M\left(^{0}_{1}n\right) - \left(M\left(^{141}_{56}Ba\right) + M\left(^{92}_{36}Kr\right) + 3M\left(^{0}_{1}n\right)\right)$

$$\Delta m = 235{,}0439 + 1{,}0087 - (91{,}9250 + 140{,}9140 + 3 \cdot 1{,}0087) = 0{,}1875\,u$$

$$0{,}1875\,(u) \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}\,(kg\ u^{-1}) = 3{,}11 \cdot 10^{-28}\,kg$$

b) La energía liberada será: $E = \Delta m c^2 = 3{,}11 \cdot 10^{-28} \cdot (3{,}00 \cdot 10^{8})^2 = 2{,}80 \cdot 10^{-11}\,J$

$$2{,}80 \cdot 10^{-11}\,(J) \cdot \frac{1\,(eV)}{1{,}60 \cdot 10^{-19}\,(J)} = 1{,}75 \cdot 10^{8}\,eV = 175\ MeV$$

15.39 Determina la energía que se libera en el siguiente proceso de fusión nuclear:

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

Expresa el resultado en julios y MeV.

Datos. $M\left(^{1}_{1}H\right) = 1{,}007825$ u; $M\left(^{2}_{1}H\right) = 2{,}013553$; $M\left(^{3}_{1}H\right) = 3{,}016049$ u; $c = 3{,}00 \cdot 10^{8}$ m s^{-1}; 1 u = $1{,}66 \cdot 10^{-27}$ kg; e = $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ J

La pérdida de masa es: $\Delta m = 2M\left(^{2}_{1}H\right) - \left(M\left(^{3}_{1}H\right) + M\left(^{1}_{1}H\right)\right) = 2 \cdot 2{,}013553 - (3{,}016049 + 1{,}007825) = 0{,}003232\,u$

$$0{,}003232\,(u) \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}\,(kg\ u^{-1}) = 5{,}37 \cdot 10^{-30}\,kg$$

La energía liberada será: $E = \Delta m c^2 = 5{,}37 \cdot 10^{-30} \cdot (3{,}00 \cdot 10^{8})^2 = 4{,}83 \cdot 10^{-13}\,J$

$$4{,}83 \cdot 10^{-13}\,(J) \cdot \frac{1\,(eV)}{1{,}60 \cdot 10^{-19}\,(J)} = 3{,}02 \cdot 10^{6}\,eV = 3{,}02\ MeV$$

15.40 Cuando se bombardea un núcleo de ${}^{7}_{3}Li$ con un protón, este se descompone en dos partículas α.

a) Escribe y ajusta la reacción nuclear del proceso.

b) Calcula la energía liberada en dicha desintegración. Expresa el resultado en eV.

Datos. M$\left({}^{7}_{3}Li\right)$ = 7,0182 u; M$\left({}^{1}_{1}H\right)$ =1,0076; M$\left({}^{4}_{2}He\right)$ = 4,0029 u

a) La ecuación será: ${}^{7}_{3}Li + {}^{1}_{1}H \rightarrow 2\ {}^{4}_{2}He$

b) La pérdida de masa será: $\Delta m = M\left({}^{7}_{3}Li\right) + \left(M\left({}^{1}_{1}H\right) - 2M\left({}^{4}_{2}He\right)\right) = 7{,}0182 + 1{,}0076 - 2 \cdot 4{,}0029 = 0{,}0200\ u$

$$0{,}0200\,(u) \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}\,(kg\ u^{-1}) = 3{,}32 \cdot 10^{-29}\,kg\ ;\ E = \Delta m\, c^2 = 3{,}32 \cdot 10^{-29} \cdot (3{,}00 \cdot 10^{8})^2 = 2{,}99 \cdot 10^{-12}\,J$$

$$2{,}99 \cdot 10^{-12}\,(J) \cdot \frac{1(eV)}{1{,}60 \cdot 10^{-19}\,(J)} = 1{,}87 \cdot 10^{7}\,eV$$

15.41 Durante el proceso de fisión de un núcleo de ${}^{235}_{92}U$ por un neutrón se liberan 198 MeV. Determina la energía liberada al fisionarse al 100%, 1 kg de uranio.

Datos. M$\left({}^{235}_{92}U\right)$ = 235,04 u; N_A = 6,022 · 10^{23} núcleos mol^{-1}

1 kg de U-235 contiene: $\dfrac{1000\,(g)}{235{,}04\,(g\,mol^{-1})} = 4{,}2546$ moles

1 kg de U-235 contiene: $4{,}256\,(mol) \cdot 6{,}022 \cdot 10^{23}\,(núc.\ mol^{-1}) = 2{,}5621 \cdot 10^{24}$ núcleos

La cantidad total de energía liberada es $1{,}98 \cdot 10^{8}\,(eV\ núcleo^{-1}) \cdot 2{,}5621 \cdot 10^{24}\,(núcleos) = 5{,}07 \cdot 10^{32}\,eV$

$$5{,}07 \cdot 10^{32}\,(eV) \cdot 1{,}60 \cdot 10^{-19}\,(J\ eV^{-1}) = 8{,}11 \cdot 10^{13}\,J$$

15.42 Suponiendo que la reacción de fusión $2\,{}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He$ se pudiese realizar de forma industrial para producir energía eléctrica con un rendimiento del 25%, determina la cantidad de agua necesaria para atender a la demanda mundial de energía en el año 2030 que se supone de 24 TW, es decir, de un total de 7,57 · 10^{20} julios.

El porcentaje de deuterio en el agua es del 0,015%.

Datos. M$\left({}^{2}_{1}H\right)$ = 2,013553; M$\left({}^{4}_{2}He\right)$ = 4,00387 u; c = 3,00 · 10^{8} m s^{-1}; 1 u = 1,66 · 10^{-27} kg

Cada fusión $2\,{}^{2}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He$ produce una pérdida de masa:

$$\Delta m = 2M\left({}^{2}_{1}H\right) - M\left({}^{4}_{2}He\right) = 2 \cdot 2{,}013553 - \cdot 4{,}00387 = 0{,}023236\ u$$

La masa en kg será: $0{,}023236\,(u) \cdot 1{,}66 \cdot 10^{-27}\,(kg\ u^{-1}) = 3{,}86 \cdot 10^{-29}\,kg$

La energía liberada será: $E = \Delta m\, c^2 = 3{,}86 \cdot 10^{-29} \cdot (3{,}00 \cdot 10^{8})^2 = 3{,}47 \cdot 10^{-12}\,J$

Por tanto, serían necesarias: $7{,}57 \cdot 10^{20}\,(J) \dfrac{1\,(fusión)}{3{,}47 \cdot 10^{-12}\,(J)} = 2{,}18 \cdot 10^{32}$ fusiones

1 mol de H_2O equivale a 18,0 g de los cuales 2,0 g son de hidrógeno y 2,0 · 0,00015 = 3,0 · 10^{-4} g son de deuterio. En esos gramos existen $2 \cdot 6{,}022 \cdot 10^{23} \cdot 0{,}00015 = 1{,}8 \cdot 10^{20}$ átomos de deuterio .

Para producir las fusiones necesarias, son precisos:

$$\frac{2{,}18 \cdot 10^{32}\,(fusiones)}{1{,}8 \cdot 10^{20}\,(átomos\ mol^{-1})} = 1{,}2 \cdot 10^{12}\ mol\ de\ agua\ ;\ 1{,}2 \cdot 10^{12}\,(mol) \cdot 18\,(g\ mol^{-1}) = 2{,}2 \cdot 10^{13}\,g = 2{,}2 \cdot 10^{10}\ kg\ de\ agua$$

Estos valores están calculados suponiendo un rendimiento del 100%. Si el rendimiento es del 25% se necesitarían 8,8 · 10^{10} kg de agua (88 hm^3).

15.43 La reacción de fisión más común del uranio-235 en los procesos de reacciones en cadena es:

$$^{235}_{92}\text{U} + {}^{1}_{0}\text{n} \rightarrow {}^{144}_{56}\text{Ba} + {}^{89}_{36}\text{Kr} + 3\ {}^{1}_{0}\text{n} + 200\ \text{MeV}$$

Una determinada central nuclear en la que se produce esta reacción tiene una potencia térmica de 4500 MW y las barras de combustible tienen una masa de 2,5 t y una riqueza del 3% en $^{235}_{92}\text{U}$.

a) Determina los gramos de material fisionable que se consumen cada día.

b) ¿Cada cuánto tiempo habrá que efectuar una recarga de combustible?

a) La central produce 4500 MW = 4,5 · 10^9 J s^{-1}.

Cada fisión produce $200\,\text{MeV} = 2{,}00 \cdot 10^8\,\text{eV} = 2{,}00 \cdot 10^8\,(\text{eV}) \cdot 1{,}60 \cdot 10^{-19}\,(\text{J}\,\text{eV}^{-1}) = 3{,}20 \cdot 10^{-11}\,\text{J}$

Cada segundo son necesarias $\dfrac{4{,}500 \cdot 10^9\,(\text{J})}{3{,}20 \cdot 10^{-11}\,(\text{J fisión}^{-1})} = 1{,}41 \cdot 10^{20}$ fisiones

Cada día se necesitan $24 \cdot 3600 \cdot 1{,}41 \cdot 10^{20} = 1{,}22 \cdot 10^{25}$ fisiones

Por tanto, se consumirán: $\dfrac{1{,}22 \cdot 10^{25}\,(\text{fisiones})}{6{,}02 \cdot 10^{23}\,(\text{fisiones mol}^{-1})} = 20{,}3$ mol de U – 235

Diariamente se necesitan: 20,3 · 235,04 = 4770 g = 4,77 kg de U-235

b) En 2,5 t hay 2500 · 0,03 = 75,00 kg de U-235 que se consumen en $\dfrac{75{,}00\,(\text{kg})}{4{,}77\,(\text{kg día}^{-1})} = 15{,}7$ días

APLICACIONES Y RIESGOS DE LA ENERGÍA NUCLEAR

15.44 Señala la diferencia entre dosis de radiación absorbida y dosis de radiación equivalente. Indica sus unidades en el SI.

La dosis equivalente es el producto de la dosis absorbida por un coeficiente llamado de eficacia biológica relativa (EBR) que depende del tipo de radiación. Para los rayos X de 250 kV, el EBR es 1, sin embargo, para los neutrones y partículas α, el EBR es 10.

La dosis absorbida de mide en J kg^{-1} denominado gray (Gy). La dosis equivalente se acostumbra a medir en sieverts (Sv), donde 1 Sv también es 1 J kg^{-1}.

15.45 Indica si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas.

a) El coeficiente de eficacia biológica (EBR) de un neutrón es el mismo que el de una partícula α.

b) La unidad de actividad de una muestra radiactiva en SI es el curio (Ci).

c) El sievert (Sv) es una medida de la exposición radiactiva.

d) La peligrosidad de una exposición se mide por la energía absorbida por kilogramo de tejido vivo.

a) Verdadero. El EBR es 10 en ambos casos.

b) Falso. Es el Bq (1 Ci = 3,7 · 10^{10} Bq).

c) Falso. El sievert mide la dosis equivalente.

d) Verdadero. Ese es el parámetro más importante.

15.46 Relaciona los siguientes radioisótopos con su aplicación médica.

Yodo-131	**Leucemia**
Cobalto-60	**Tumores de tiroides**
Fósforo-30	**Braquiterapia**
Oro-198	**Tumores de cuello**

Yodo-131	Tumores de tiroides
Cobalto-60	Tumores de cuello
Fósforo-30	Leucemia
Oro-198	Braquiterapia

15.47 Indica cuáles de las siguientes aplicaciones corresponden a las radiaciones ionizantes.

a) Radiación de alimentos.

b) Bronceado de la piel.

c) Obtención de espectros atómicos.

d) Esterilización de material médico.

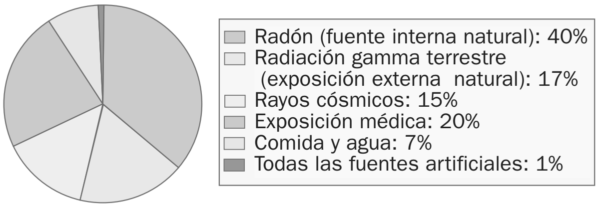
e) Modificación genética de plantas.

Se emplean en radiación de alimentos (a), esterilización de material médico (d) y modificación genética de plantas (e).

15.48 Se sabe que la dosis de radiación equivalente máxima aconsejada por la Unión Europea que debe recibir al año una persona que no trabaje con radiaciones ionizantes es 0,01 Sv. Si cada radiografía torácica a la que se somete una persona supone una dosis de 0,1 mSv , calcula cuantas radiografías de este tipo se puede hacer una persona en un año sin riesgo importante.

Podría hacerse $\dfrac{0{,}01(\text{Sv})}{0{,}0001(\text{Sv radiografía}^{-1})} = 100$ radiografías

15.49 La siguiente figura muestra el origen de las radiaciones ionizantes a las que está expuesta una persona por término medio.



Si el total para una persona determinada es 0,05 Sv al año, indica que parte de esta radiación corresponde a cada apartado.

Radón: 0,02 Sv; radiación γ terrestre: 0,0085 Sv; rayos cósmicos: 0,0075; exposición médica: 0,01 Sv; comida y agua: 0,004 Sv; fuentes artificiales: 0,0005 Sv.

15.50 Existe otra línea de investigación para la creación de centrales de fusión denominada confinamiento inercial.

Consiste en impactar sobre una microgota de deuterio o tritio con múltiples haces láser para conseguir una implosión que caliente el plasma hasta la temperatura de fusión de los núcleos. Puedes buscar más información sobre la fusión nuclear en general y sobre el confinamiento inercial en particular en la dirección de internet:

www.e-sm.net/f2bach69

Respuesta libre.

PROBLEMA DE SÍNTESIS

15.51 Los científicos de principio del siglo XXI tratan de reproducir e identificar las fuerzas y partículas fundamentales de la naturaleza que se pusieron de manifiesto en los primeros instantes del universo.

En el gran colisionador de hadrones (LHC), los protones se acelerarán hasta que alcancen una energía de 7 TeV cada uno. Si se produce un choque de frente entre dos protones el total de energía de la colisión es de 14 TeV.

Pero aún estamos en los comienzos y, como muestra, considera el siguiente hecho:

El 15 de octubre de 1991, en el desierto americano de Dugway Proving Grounds, Utah (Estados Unidos), sucedió un hecho singular: un detector de rayos cósmicos allí instalado contabilizó la llegada de un protón a la parte superior de la atmósfera con una energía de $3{,}2 \cdot 10^{20}$ eV. Aparte de algunos otros impactos singulares similares, son corrientes rayos cósmicos con energías superiores a 10^{15} eV. Se piensa que los rayos cósmicos tienen su origen en agujeros negros supermasivos que devoran grandes cantidades de materia de la galaxia donde se encuentran, emitiendo a cambio gigantescas cantidades de radiación.

Respecto a las energías alcanzadas, compara la capacidad de la ciencia y la técnica de comienzo del siglo XXI con la capacidad de la propia naturaleza.

Suponiendo que toda la energía de un rayo cósmico se transformase en energía potencial al impactar con un objeto, indica qué le sucedería a una persona de 60 kg que fuese alcanzada por el rayo cósmico anteriormente citado.

¿Qué cantidad de materia, en kilogramos, debe transformarse en energía, según la ecuación de Einstein, para conseguir 7 TeV y $3{,}2 \cdot 10^{20}$ eV?

En el LHC, un choque frontal de protones liberará una energía de 14 TeV = $14 \cdot 10^{12}$ eV. Comparando esta energía con la del protón contabilizado en el detector de rayos cósmicos de Utah:

$$\frac{3{,}2 \cdot 10^{20}(\text{J})}{14 \cdot 10^{12}(\text{J})} = 2{,}3 \cdot 10^{7} \text{ veces mayor}$$ (la energía del rayo cósmico era unas 23 millones de veces mayor).

Para conseguir multiplicar por 100 la energía del LHC respecto al anterior acelerador del CERN, han sido necesarios 15 años de trabajo y unos 6000 millones de euros. No parece que reproducir las fuerzas originales del universo esté a nuestro alcance todavía (pero por supuesto que merece la pena el esfuerzo, dada la gran cantidad de investigación en otras ramas de la física que conlleva el LHC).

La energía de un rayo cósmico es: $3{,}2 \cdot 10^{20}\ \text{eV} = 3{,}2 \cdot 10^{20}(\text{eV}) \cdot 1{,}60 \cdot 10^{-19}(\text{J eV}^{-1}) = 51{,}2\ \text{J}$

Una sola partícula subatómica tenía una energía de un orden de magnitud macroscópico, y, si se transformase en energía potencia al impactar sobre una persona, la elevaría:

$$E_p = mgh \Rightarrow h = \frac{E_p}{mg} = \frac{51{,}2}{60 \cdot 9{,}8} = 0{,}087\ \text{m}$$ es decir, la elevaría 8,7 cm.

La relación entre la masa y la energía es: $E = mc^2 \Rightarrow m = \dfrac{E}{c^2}$

$$m_1 = \frac{7 \cdot 10^{12}(\text{eV}) \cdot 1{,}60 \cdot 10^{-19}(\text{J eV}^{-1})}{(3{,}00 \cdot 10^{8})^2\ (\text{m s}^{-1})^2} = 1{,}24 \cdot 10^{-23}\ \text{kg}$$

$$m_2 = \frac{3{,}2 \cdot 10^{20}(\text{eV}) \cdot 1{,}60 \cdot 10^{-19}(\text{J eV}^{-1})}{\left(3{,}00 \cdot 10^{8}\right)^2 \left(\text{m s}^{-1}\right)^2} = 5{,}69 \cdot 10^{-16}\ \text{kg}$$