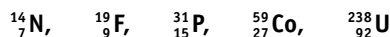




## ■ Actividades

### 1. a) Indica la composición de los siguientes núcleos:



### b) Indica la composición de los núcleos de PU-244 y PU-239.

a) N: 7p y 7n; F: 9p y 10n; P: 15p y 16n; Co: 27p y 32n; U: 92p y 146n

b) Pu: 94p y 150n; 94p y 145n.

### 2. ¿Cuál es la masa de 1 u expresada en kg? ¿Cuál es su equivalencia en MeV?

En un mol de carbono (12 g) hay  $6,02 \cdot 10^{23}$  átomos (número de Avogadro); 1 u es la doceava parte de la masa atómica del carbono-12. Su valor es:

$$1 \text{ u} = \frac{12 \text{ g mol}^{-1}}{12 \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

$$E = mc^2 = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (3,00 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1})^2 = 1,49 \cdot 10^{-10} \text{ J} = 931 \text{ MeV}$$

### 3. Determina la masa atómica del cloro sabiendo que existen dos isótopos $^{35}_{17}\text{Cl}$ y $^{37}_{17}\text{Cl}$ cuya abundancia relativa es 77,5% y 22,5% respectivamente. ¿Cuál es la composición de los núcleos de ambos isótopos?

$$0,775 \cdot 35 \text{ u} + 0,225 \cdot 37 \text{ u} = 35,45 \text{ u}$$

Núcleo de cloro-35: 17 protones y  $35 - 17 = 18$  neutrones.

Núcleo de cloro-37: 17 protones y  $37 - 17 = 20$  neutrones.

### 4. ¿Qué se entiende por estabilidad nuclear? Explica, cualitativamente, la dependencia de la estabilidad nuclear con el número másico.

La energía que se libera al formarse un núcleo a partir de los nucleones que lo constituyen se denomina energía de enlace. Cuanto mayor es la energía de enlace, mayor es la estabilidad del núcleo.

La energía de enlace por nucleón se obtiene se obtiene dividiendo la energía de enlace entre el número de nucleones que contiene. Cuanto mayor sea la energía de enlace por nucleón, más estable es el núcleo. La mayor estabilidad se presenta para números másicos comprendidos entre 40 y 100, aproximadamente. El núcleo más estable es el del hierro-56.

### 5. Determina el defecto de masa, la energía de enlace y la energía de enlace por nucleón para el núcleo del carbono-12.

El núcleo está formado por 6 protones y 6 neutrones. La masa de estas partículas es la siguiente:

Masa de 6 protones:	$6 \cdot 1,0073 \text{ u} = 6,0438 \text{ u}$
Masa de 6 neutrones:	$6 \cdot 1,0087 \text{ u} = 6,0522 \text{ u}$
Masa total:	12,0960 u
Masa del núcleo de carbono-12:	12,0000 u
Defecto de masa:	0,0960 u

Como 1 u equivale a 931 MeV, la energía de enlace es:

$$E = 0,0960 \text{ u} \cdot 931 \text{ MeV/u} = 89,4 \text{ MeV}$$

El núcleo del carbono-12 contiene 12 nucleones; por tanto, la energía de enlace por nucleón es:

$$\frac{E}{A} = \frac{89,4 \text{ MeV}}{12 \text{ nucleones}} = 7,4 \text{ MeV/nucleón}$$

### 6. Define las siguientes magnitudes asociadas con los procesos de desintegración radiactiva: actividad, constante de desintegración, periodo de semidesintegración y vida media. Indica sus unidades en el Sistema Internacional.

La actividad o velocidad de desintegración de una sustancia radiactiva es el número de desintegraciones por unidad de tiempo. Su unidad en el SI es el becquerel (Bq).

La constante de desintegración representa la probabilidad de que un determinado núcleo radiactivo se desintegre. Su unidad en el SI es el  $\text{s}^{-1}$ .

El periodo de semidesintegración es el tiempo que debe transcurrir para que el número de núcleos presentes en una muestra radiactiva se reduzca a la mitad. Su unidad en el SI es el segundo.

La vida media es el promedio de vida, es decir, el tiempo que por término medio tardará un núcleo en desintegrarse. Su unidad en el SI es el segundo.

### 7. A partir del $^{214}_{84}\text{Po}$ se han emitido sucesivamente las siguientes partículas: $\alpha$ , $\beta$ , $\beta$ , $\beta$ , $\alpha$ y $\beta$ , ¿cuál es el núcleo final estable? ¿Qué núcleos se han formado en los pasos intermedios?

Por aplicación de las leyes de Soddy y Fajans, se obtiene:

$$\text{Número atómico: } 84 - (2 \cdot 2) + (4 \cdot 1) = 84$$

$$\text{Número másico: } 214 - (2 \cdot 4) = 206$$

Los núcleos formados en los pasos intermedios son:  $^{210}_{82}\text{Pb}$ ,  $^{210}_{83}\text{Bi}$ ,  $^{210}_{84}\text{Po}$ ,  $^{210}_{85}\text{At}$ ,  $^{206}_{83}\text{Bi}$ ,  $^{206}_{84}\text{Po}$

### 8. De los 120 g iniciales de una muestra radiactiva se han desintegrado, en 1 hora, el 10% de los núcleos. Determina:

#### a) La constante de desintegración radiactiva y el periodo de semidesintegración de la muestra.

#### b) La masa que quedará de la sustancia radiactiva transcurridas 5 horas.

$$\text{Masa final: } 120 \text{ g} - 0,10 \cdot 120 = 108 \text{ g}$$

$$m = m_0 \cdot e^{-\lambda t}; 108 \text{ g} = 120 \text{ g} \cdot e^{-\lambda \cdot 3600 \text{ s}}; \lambda = 2,93 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{2,93 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}} = 2,37 \cdot 10^4 \text{ s}$$

$$b) m = m_0 \cdot e^{-\lambda t}; m = 120 \text{ g} \cdot e^{-2,93 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1} \cdot 5 \cdot 3600 \text{ s}}; m = 70,8 \text{ g}$$

### 9. Cuando se encuentra fuera del núcleo atómico, el neutrón es una partícula inestable con una vida media de 885,7 s. Determine:

#### a) El periodo de semidesintegración del neutrón y su constante de desintegración.

#### b) Una fuente de neutrones emite $10^{10}$ neutrones por segundo con una velocidad constante de $100 \text{ km s}^{-1}$ . ¿Cuántos neutrones por segundo recorren una distancia de $3,7 \cdot 10^5 \text{ km}$ sin desintegrarse?



$$a) T_{1/2} = L2 \cdot \tau = 0,6931 \cdot 885,7 \text{ s} = 613,9 \text{ s}; \lambda = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{885,7 \text{ s}} = 1,129 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

$$b) \text{Tiempo en recorrer } s: 3,7 \cdot 10^5 \text{ km} / 100 \text{ km s}^{-1} = 3,7 \cdot 10^3 \text{ s}$$

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}; N = 10^{10} \cdot e^{-1,129 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \text{ s}};$$

$$N = 1,53 \cdot 10^8 \text{ neutrones/s}$$

10. Una muestra de radón-222 contiene inicialmente  $10^{12}$  átomos de este isótopo radiactivo, cuya semivida (o periodo de semidesintegración) es de 3,28 días. ¿Cuántos átomos quedan sin desintegrar al cabo de 10 días? Calcula las actividades inicial y final, tras los 10 días, de esta muestra. (Expresa los resultados en Bq).

$$\text{La constante de desintegración es: } \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{\ln 2}{3,28 \text{ días}} = 0,211 \text{ día}^{-1} = 2,44 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

$$\text{Átomos sin desintegrar: } N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}; N = 10^{12} \cdot e^{-0,211 \text{ día}^{-1} \cdot 10 \text{ día}};$$

$$1,2 \cdot 10^{11} \text{ átomos.}$$

$$\text{Actividad inicial: } A_0 = \lambda N_0 = 2,44 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1} \cdot 10^{12} \text{ átomos} = 2,44 \cdot 10^6 \text{ Bq}$$

$$\text{Actividad final: } A = 2,44 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1} \cdot 1,2 \cdot 10^{11} \text{ átomos} = 2,9 \cdot 10^5 \text{ Bq}$$

11. ¿Qué es una serie o familia radiactiva? Cita un ejemplo.

Una serie radiactiva es el conjunto de núcleos que se producen por desintegración de uno inicial (núcleo padre) hasta llegar a uno estable. Ejemplo: familia del uranio-238.

12. Se dispone de 20 g de una muestra radiactiva y transcurridos 2 días se han desintegrado 15 g de la misma. Calcula:

a) La constante de desintegración radiactiva de dicha muestra.

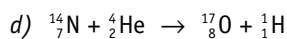
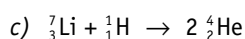
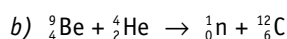
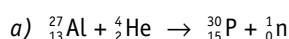
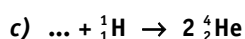
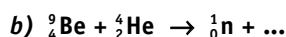
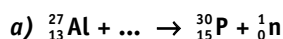
b) El tiempo que debe transcurrir para que se desintegre el 90% de la muestra.

$$a) m = m_0 \cdot e^{-\lambda t}; 5 \text{ g} = 20 \text{ g} \cdot e^{-\lambda \cdot 2 \text{ día}}; \lambda = 0,695 \text{ día}^{-1}$$

$$b) \text{Quedan 2 g de muestra: } m = m_0 \cdot e^{-\lambda t};$$

$$2 \text{ g} = 20 \text{ g} \cdot e^{-0,695 \text{ día}^{-1} \cdot t}; t = 3,31 \text{ días}$$

13. Completa las siguientes reacciones nucleares:



14. Calcula la cantidad de energía que se libera en la siguiente reacción de fisión nuclear:  ${}_{92}^{235}\text{U} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{92}^{92}\text{Kr} + {}_{141}^{141}\text{Ba} + 3 {}_0^1\text{n}$ .

$$\text{Defecto de masa: } \Delta m = m_{\text{U}} + m_{\text{n}} - (m_{\text{Kr}} + m_{\text{Ba}} + 3 m_{\text{n}})$$

$$\Delta m = 235,0439 \text{ u} + 1,0087 \text{ u} - (91,9251 \text{ u} + 140,9140 \text{ u} + 3 \cdot 1,0087 \text{ u}) = 0,1874 \text{ u}$$

$$E = mc^2 = 0,1874 \text{ u} \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg/u} \cdot (3,00 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1})^2 = 2,80 \cdot 10^{-11} \text{ J} = 175 \text{ Mev}$$

15. Explica en qué consisten las reacciones de fusión y fisión nucleares. ¿En qué se diferencian? ¿Cuál es el origen de la energía que producen?

Ver epígrafe 13.4 del libro de texto.

16. ¿Qué características presentan los reactores reproductores? ¿Qué inconvenientes puede presentar su utilización?

Producen nuevo material fisionable, incluso en mayor cantidad que el consumido durante su funcionamiento.

El plutonio-239 producido puede utilizarse para fabricar armas nucleares.

17. ¿Qué es la masa crítica? ¿Se puede producir una explosión nuclear, similar a una bomba atómica, en un reactor nuclear?

Se denomina masa crítica a la cantidad mínima de material fisionable necesaria para producir una reacción en cadena.

En un reactor nuclear no se puede producir una explosión similar a una bomba atómica, porque el material fisionable está poco enriquecido en uranio-235.

18. Explica la función que desempeñan los siguientes componentes de un reactor nuclear:

- a) uranio enriquecido; b) blindaje;  
c) barras de control; d) moderador;  
e) cambiador de calor; f) agua de refrigeración.

a) El uranio enriquecido es el material fisionable, el «combustible» del reactor.

b) El blindaje impide la salida al exterior del reactor de las distintas radiaciones.

c) Las barras de control absorben neutrones y regulan la reacción en cadena.

d) El moderador frena los neutrones rápidos producidos en la fisión.

e) El calor producido en el reactor se recoge en el circuito primario que cede al circuito secundario en el cambiador de calor.

f) El vapor de agua que sale de la turbina se licua en el condensador, enfriándose mediante el agua de refrigeración. El vapor producido puede verse sobre las inmensas torres de refrigeración de las centrales nucleares.

19. El Sol emite aproximadamente  $3,6 \cdot 10^{26} \text{ J}$  de energía cada segundo. Averigua cuánto tiempo tardará la masa del Sol en reducirse a la mitad, suponiendo que la radiación permanezca constante.

Datos: masa del Sol =  $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ .

La energía producida por el Sol se debe a procesos de fusión nuclear. La masa equivalente a  $3,6 \cdot 10^{26} \text{ J}$ .

$$\Delta m = \frac{E}{c^2} = \frac{3,6 \cdot 10^{26} \text{ J}}{(3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1})^2} = 4 \cdot 10^9 \text{ kg}$$

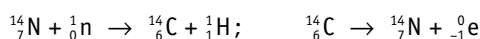
es decir, el Sol pierde  $4 \cdot 10^9 \text{ kg}$  de masa cada segundo. Como su masa es de  $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ , para que se reduzca a la mitad ha de transcurrir el siguiente tiempo:



$$t = \frac{1 \cdot 10^{30} \text{ kg}}{4 \cdot 10^9 \text{ kg s}^{-1}} = 2,5 \cdot 10^{20} \text{ s} \approx 7,9 \cdot 10^{12} \text{ años}$$

Antes de que transcurra ese tiempo, el Sol se convertirá en una «gigante roja» y después en una «enana blanca».

20. Algunos átomos de  $^{14}_7\text{N}$  atmosférico chocan con un neutrón y se transforman en  $^{14}_6\text{C}$  que, por emisión beta, se convierten de nuevo en nitrógeno. Escribe las correspondientes reacciones nucleares.



21. Una muestra de madera encontrada en un yacimiento arqueológico presenta una actividad radiactiva que es cinco veces menor que la correspondiente a una muestra de madera nueva de igual masa. Sabiendo que el periodo de semidesintegración del carbono-14 es de 5 730 años, ¿cuál es la antigüedad de la muestra encontrada?

$$\text{Constante de desintegración: } \lambda = \frac{L}{T_{1/2}} = \frac{L}{5730 \text{ años}} = 1,21 \cdot 10^{-4} \text{ años}^{-1}$$

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}; \quad \frac{A_0}{5} = A_0 \cdot e^{-1,21 \cdot 10^{-4} \text{ años} \cdot t}; \quad t = 1,33 \cdot 10^4 \text{ años}$$

22. Indica los nombres y las características de los seis leptones. ¿Por qué se dice que están apareados?

Electrón ( $e^-$ ), muón ( $\mu^-$ ), tauón ( $\tau^-$ ), neutrino electrónico ( $\nu_e$ ), neutrino muónico ( $\nu_\mu$ ) y neutrino tauónico ( $\nu_\tau$ ).

Cada pareja de leptones está formada por un leptón cargado negativamente y su correspondiente neutrino.

23. Describe la estructura atómica y nuclear del a partir de su composición en quarks y electrones.

El núcleo atómico consta de 2 protones y 2 neutrones. Cada protón está formado dos quarks  $u$  y un quark  $d$ . Cada neutrón está formado por un quark  $u$  y dos quarks  $d$ .

El átomo tiene dos electrones situados en el orbita 1s.

24. Expresa la masa del quark  $d$  en kilogramos.

Masa del quark  $d = 6 \text{ MeV}/c^2$ .

$$m = \frac{6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}}{(3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1})^2} = 1,1 \cdot 10^{-29} \text{ kg}$$

25. Explica la carga eléctrica del protón en función de los quarks que lo constituyen.

$$\text{Protón } (u, u, d): \quad 2 \left( +\frac{2}{3} e \right) + \left( -\frac{1}{3} e \right) = +e$$

26. Explica las características de la materia y la antimateria. ¿En qué se convierten la materia y la antimateria cuando se aniquilan entre sí?

Véase el Apartado 13.8 del libro de texto.

27. ¿Cuál es el concepto de cuerda? ¿Qué características tiene?

Las cuerdas son pequeñísimos bucles unidimensionales que vibran. El tamaño de una cuerda es unas  $10^{20}$  veces menor que el núcleo de un átomo, son indivisibles y los componentes más fundamentales de la naturaleza.

Las características de cada partícula están determinadas por el modo de vibración de la cuerda.

28. ¿Cómo se relaciona la vibración de las cuerdas con la fuerza gravitatoria?

Cuanto mayor sea la amplitud y la frecuencia de vibración de la cuerda, mayor es la energía y, por tanto, mayor será la masa, de acuerdo con la relación relativista entre masa y energía. Pero la masa determina las propiedades gravitatorias. Por tanto, existe una relación directa entre el modelo de vibración de la cuerda y la fuerza gravitatoria.

La teoría de las cuerdas une la Relatividad general de Einstein con la Mecánica cuántica y explica la gravedad. Cuando la cuerda se mueve en el espacio-tiempo, ambos se curvan, se deforman, de acuerdo con la relatividad general.

29. ¿Qué función realizan las partículas portadoras de fuerzas? ¿Cuáles son esas partículas?

Transmiten las interacciones entre las partículas de materia. La fuerza electromagnética se transmite mediante fotones, la fuerza nuclear débil mediante los bosones masivos  $W$  y  $Z$ , la interacción nuclear fuerte mediante gluones y la fuerza gravitatoria se supone que se transmite mediante gravitones.

30. Trabajando en equipo, con la bibliografía adecuada, incluido Internet, presentad una cronología del Universo en función de la temperatura y de las partículas que lo formaban en cada periodo, discutiendo la asimetría entre materia y antimateria.

Actividad para realizar en equipo, comparando los resultados obtenidos y poniéndolos en común.

## ■ Ciencia, tecnología y sociedad

1. ¿Qué relación existe entre las partículas elementales y el campo de Higgs?

La masa de cada partícula surge de su intervención con el campo de Higgs.

2. Además del bosón de Higgs, ¿qué otros bosones conoces?

Partículas  $W$  y  $Z$ , fotones y gluones.

3. ¿Por qué resultó tan difícil descubrir el bosón de Higgs?

Por su elevada masa, solo puede detectarse mediante choques de partículas de muy alta energía.

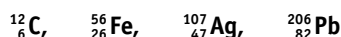
4. ¿Cuáles son las características más importantes del bosón de Higgs?

Es muy inestable, spin cero, sin carga eléctrica y de masa muy grande, unos 125 GeV.

## ■ Problemas propuestos

### ■ Núcleo atómico

1. Indica el número de protones y neutrones que componen los siguientes núcleos:



C: 6p y 6n; Fe: 26p y 30n; Ag: 47p y 60n; Pb: 82p y 124 n.

## 2. ¿Qué te sugiere la enorme diferencia existente entre la densidad nuclear y la densidad de la materia ordinaria?

La diferencia de densidad indica que la materia ordinaria está prácticamente «vacía», pues la densidad de las partículas es mucho mayor que la de la materia visible.

## 3. La masa del núcleo de litio-7 es 7,0182 u. Calcula el volumen aproximado del núcleo y su densidad.

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot (1,2 \cdot 10^{-15} \cdot A^{1/3})^3 =$$

$$= \frac{4}{3} \cdot 3,14 \cdot 1,728 \cdot 10^{-45} \cdot 7 = 5,07 \cdot 10^{-44} \text{ m}^3$$

$$\text{Masa: } m = 7,0182 \text{ u} \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg/u} = 1,16 \cdot 10^{-26} \text{ kg}$$

$$\text{Densidad: } d = \frac{m}{V} = \frac{1,16 \cdot 10^{-26} \text{ kg}}{5,07 \cdot 10^{-44} \text{ m}^3} = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

## 4. Calcula el defecto de masa, la energía de enlace y la energía de enlace por nucleón para el núcleo de helio-3.

**Datos:** masa del protón = 1,00729 u; masa del neutrón = 1,00867 u; masa del helio-3 = 3,01603 u.

El núcleo está formado por 2 protones y 1 neutrón:

$$\text{Masa de 2 protones: } 2 \cdot 1,00729 \text{ u} = 2,01458 \text{ u}$$

$$\text{Masa de 1 neutrón: } 1,00867 \text{ u} = 1,00867 \text{ u}$$

$$\text{Masa total: } 3,02325 \text{ u}$$

$$\text{Masa del núcleo: } 3,01603 \text{ u}$$

$$\text{Defecto de masa: } 0,00722 \text{ u}$$

Energía de enlace:

$$E = 0,00722 \text{ u} \cdot 931 \text{ MeV/u} = 6,72 \text{ MeV}$$

Energía de enlace por nucleón:

$$\frac{E}{A} = \frac{6,72 \text{ MeV}}{3} = 2,24 \text{ MeV/nucleón}$$

## 5. Calcula el defecto de masa, la energía total de enlace y la energía de enlace por nucleón del isótopo de masa atómica 15,0001089 u.

**Datos:**  $m_p = 1,007276 \text{ u}$ ;  $m_n = 1,008665 \text{ u}$ ;  $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .

$$\text{Masa total: } 7 \cdot 1,007276 \text{ u} + 8 \cdot 1,008665 \text{ u} = 15,120252 \text{ u}$$

$$\Delta m = 15,120252 \text{ u} - 15,0001089 \text{ u} = 0,120143 \text{ u}$$

$$\text{Energía de enlace: } E = 0,120143 \text{ u} \cdot 931 \text{ MeV/u} = 112 \text{ MeV}$$

$$\text{Energía de enlace por nucleón: } 112 \text{ MeV} / 15 \text{ nucleones} = 7,5 \text{ MeV / nucleón}$$

## 6. Determina la energía de enlace por nucleón del $^{56}_{26}\text{Fe}$ y del $^{39}_{19}\text{K}$ si las masas de sus núcleos son 55,934939 u y 38,964001 u, respectivamente. Indica cuál de ellos es más estable.

**Datos:**  $m_p = 1,007276 \text{ u}$ ;  $m_n = 1,008665 \text{ u}$ .

Para el  $^{56}_{26}\text{Fe}$ :

$$\text{Masa de 26 protones: } 26 \cdot 1,007276 \text{ u} = 26,189176 \text{ u}$$

$$\text{Masa de 30 neutrones: } 30 \cdot 1,008665 \text{ u} = 30,259950 \text{ u}$$

$$\text{Masa total: } 56,449126 \text{ u}$$

$$\text{Masa real del núcleo: } 55,934939 \text{ u}$$

$$\text{Defecto de masa: } 0,514187 \text{ u}$$

$$\text{Energía de enlace por nucleón: } 8,5 \text{ MeV/nucleón}$$

Para el  $^{39}_{19}\text{K}$ :

$$\text{Masa de 19 protones: } 19 \cdot 1,007276 \text{ u} = 19,138244 \text{ u}$$

$$\text{Masa de 20 neutrones: } 20 \cdot 1,008665 \text{ u} = 20,173300 \text{ u}$$

$$\text{Masa total: } 39,311544 \text{ u}$$

$$\text{Masa real del núcleo: } 38,964001 \text{ u}$$

$$\text{Defecto de masa: } 0,347543 \text{ u}$$

$$\text{Energía de enlace por nucleón: } 8,3 \text{ MeV/nucleón}$$

Como la energía de enlace por nucleón es mayor en el hierro que en el potasio, el núcleo de hierro es más estable.

## 7. Razona por qué el tritio ( $^3_1\text{H}$ ) es más estable que el $^3_2\text{He}$ .

**Datos:** masa del helio-3 = 3,016029 u; masa del tritio = 3,016049 u; masa del protón =  $1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ; masa del neutrón =  $1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .

Será más estable el que tenga mayor energía de enlace por nucleón.

Las masas del protón y del neutrón en unidades de masa atómica son:

$$m_p = \frac{1,6726 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg/u}} = 1,0073 \text{ u}$$

$$m_n = \frac{1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg/u}} = 1,0087 \text{ u}$$

$$\Delta m (^3_1\text{H}) = 1,0073 \text{ u} + 2 \cdot 1,0087 \text{ u} - 3,0160 \text{ u} = 0,0087 \text{ u} = 8,10 \text{ MeV}$$

Energía de enlace por nucleón:

$$\frac{E}{A} = \frac{8,10 \text{ MeV}}{3} = 2,70 \text{ MeV/nucleón}$$

$$\Delta m (^3_2\text{He}) = 2 \cdot 1,0073 + 1,0087 \text{ u} - 3,0160 \text{ u} = 0,0073 \text{ u} = 6,80 \text{ MeV}$$

Energía de enlace por nucleón:

$$\frac{E}{A} = \frac{6,80 \text{ MeV}}{3} = 2,27 \text{ MeV/nucleón}$$

El tritio es más estable al tener mayor energía de enlace por nucleón.

## Radiactividad

### 8. Las tres radiaciones $\alpha$ , $\beta$ y $\gamma$ , ¿pueden ser emitidas por un mismo núcleo?

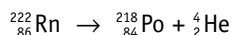
No. Un determinado núcleo se desintegra emitiendo partículas alfa o beta. La emisión gamma acompaña generalmente a las otras emisiones.

### 9. ¿Qué cambios experimenta un núcleo atómico cuando emite una partícula alfa? ¿Y si emite radiación gamma?

Si emite una partícula alfa, su número atómico disminuye en dos unidades y su número másico en cuatro.

Si emite radiación gamma, el núcleo pasa de un estado excitado a un estado de menor energía, pero su número atómico y su número másico no varían.

10. El  $^{222}_{86}\text{Rn}$  se desintegra emitiendo una partícula alfa. ¿Qué número atómico y qué número másico tiene el núcleo resultante?



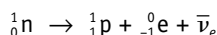
11. Determina el número atómico y el número másico del núcleo que resultará del uranio-238 después de emitir tres partículas alfa y cuatro beta.

$$\text{Número atómico: } 92 - (3 \cdot 2) + (4 \cdot 1) = 90$$

$$\text{Número másico: } 238 - (3 \cdot 4) = 226$$

12. ¿Cómo se puede explicar que un núcleo emita partículas beta si en él solo existen neutrones y protones?

Cuando la relación neutrones/protones en un núcleo es demasiado grande, el núcleo es inestable y se estabiliza convirtiendo un neutrón en un protón, según la reacción:



13. Indica en curios las siguientes actividades radiactivas expresadas en desintegraciones por segundo: 200,  $2,0 \cdot 10^6$ ,  $5,0 \cdot 10^{12}$ .

$$200 \text{ Bq} = \frac{200 \text{ Bq}}{3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq/Ci}} = 5,4 \cdot 10^{-9} \text{ Ci}$$

$$2 \cdot 10^6 \text{ Bq} = \frac{2 \cdot 10^6 \text{ Bq}}{3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq/Ci}} = 5,4 \cdot 10^{-5} \text{ Ci}$$

$$5 \cdot 10^{12} \text{ Bq} = \frac{5 \cdot 10^{12} \text{ Bq}}{3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq/Ci}} = 1,4 \cdot 10^2 \text{ Ci}$$

14. Una sustancia radiactiva se desintegra según la ecuación  $N = N_0 e^{-0,40 t}$  en unidades del SI. Calcula su periodo de semidesintegración.

De acuerdo con la ecuación fundamental de la radiactividad, se cumple:

$$N = N_0 e^{-0,40 t}; \quad \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-0,40 T_{1/2}}$$

Aplicando logaritmos neperianos se obtiene

$$-L 2 = -0,4 T_{1/2}; \quad T_{1/2} = 1,7 \text{ s}$$

15. La semivida del polonio-210 es 138 días. Si disponemos inicialmente de 1,00 mg de polonio, ¿al cabo de cuánto tiempo quedarán 0,250 mg?

Habrán transcurrido dos semividas, es decir, dos periodos de semidesintegración:

$$t = 2 \cdot 138 \text{ días} = 276 \text{ días}$$

16. Se tiene una muestra de 20 g de polonio-210, cuyo periodo de semidesintegración es de 138 días. ¿Qué cantidad quedará cuando hayan transcurrido 30 días?

La constante de desintegración es:

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{138 \text{ días}} = 5,02 \cdot 10^{-3} \text{ días}^{-1}$$

La masa no desintegrada se obtiene a partir de la ecuación fundamental de la radiactividad:

$$m = m_0 e^{-\lambda t} = 20 \cdot e^{-5,02 \cdot 10^{-3} \cdot 30} = 20 \cdot e^{-0,15} = 1,72 \text{ g}$$

17. El  $^{212}_{83}\text{Bi}$  tiene un periodo de semidesintegración de 60,5 minutos. ¿Cuántos átomos se desintegran por segundo en 50 g de bismuto-212?

Número de átomos de Bi:

$$\frac{50 \text{ g}}{212 \text{ g mol}^{-1}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \frac{\text{átomos}}{\text{mol}} = 1,42 \cdot 10^{23} \text{ átomos}$$

Actividad:

$$A = \lambda N = \frac{0,693 N}{T_{1/2}} = \frac{0,693 \cdot 1,42 \cdot 10^{23} \text{ átomos}}{3600 \text{ s}} = 2,7 \cdot 10^{19} \text{ átomos/s}$$

18. El radón-222 se desintegra con un periodo de 3,9 días. Si inicialmente se dispone de 20 µg, ¿cuánto quedará al cabo de 7,6 días?

$$\lambda = \frac{L 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{3,9 \text{ días}} = 0,178 \text{ días}^{-1}$$

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

$$m = 20 \cdot 10^{-6} \text{ g} \cdot e^{-0,178 \cdot 7,6} = 5,2 \cdot 10^{-6} \text{ g} = 5,2 \text{ µg}$$

19. Tenemos  $6,02 \cdot 10^{23}$  átomos del isótopo radiactivo cromo-51, con un periodo de semidesintegración de 27 días. ¿Cuántos átomos quedarán al cabo de seis meses?

Llamando  $T$  al periodo de semidesintegración, la constante de desintegración es:

$$\lambda = \frac{0,693}{T} = \frac{0,693}{27 \text{ días}} = 2,57 \cdot 10^{-2} \text{ días}^{-1}$$

El número de átomos que quedan sin desintegrar después de seis meses (180 días) es:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ átomos} \cdot e^{-0,0257 \cdot 180} = 5,9 \cdot 10^{21} \text{ átomos}$$

20. La constante de desintegración de una sustancia radiactiva es  $2 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ . Si tenemos 200 g de ella, ¿cuánto tiempo debe transcurrir para que se reduzca a 50 g? ¿Cuál es su periodo de semidesintegración y su semivida?

Al aplicar la ecuación fundamental de la radiactividad se obtiene:

$$m = m_0 e^{-\lambda t}; \quad 50 \text{ g} = 200 \text{ g} \cdot e^{-2 \cdot 10^{-6} t}$$

$$L \left( \frac{50}{200} \right) = 2 \cdot 10^{-6} t; \quad t = 6,9 \cdot 10^5 \text{ s}$$

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{2 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}} = 5 \cdot 10^5 \text{ s}$$

$$T_{1/2} = \tau \cdot L 2 = 5 \cdot 10^5 \text{ s} \cdot 0,693 = 3,5 \cdot 10^5 \text{ s}$$

21. La semivida del radio-226 es de 1600 años. Calcula la actividad radiactiva de una muestra de 2 g de radio-226.

La constante de desintegración es:

$$\lambda = \frac{L 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{1600 \text{ años}} = 1,4 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$





N.º de núcleos de radio:

$$N = \frac{m}{M} N_A = \frac{2 \text{ g} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}}{226 \text{ g mol}^{-1}} = 5,3 \cdot 10^{21} \text{ núcleos}$$

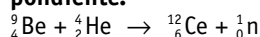
Actividad:

$$A = \lambda N = 1,4 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1} \cdot 5,3 \cdot 10^{21} \text{ núcleos} = 7,4 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

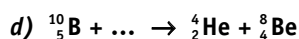
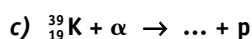
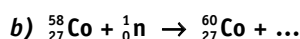
$$A = \frac{7,4 \cdot 10^{10} \text{ Bq}}{3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq/Ci}} = 2 \text{ Ci}$$

## Reacciones nucleares. Fisión y fusión nuclear

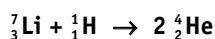
22. Al bombardear berilio-9 con partículas alfa se obtiene carbono-12 y otra partícula. Escribe la reacción nuclear correspondiente.



23. Escribe y completa las siguientes reacciones nucleares:



24. Calcula la energía que se libera en la reacción nuclear:



Datos: masa del litio-7 = 7,0182 u;  $m_p$  = 1,0073 u; masa del helio-4 = 4,0038 u.

Masa de los productos iniciales:

$$7,0182 \text{ u} + 1,0073 \text{ u} = 8,0255 \text{ u}$$

Masa de los productos finales:

$$2 \cdot 4,0038 \text{ u} = 8,0076 \text{ u}$$

Defecto de masa:

$$8,0255 \text{ u} - 8,0076 \text{ u} = 0,0179 \text{ u}$$

Energía liberada:

$$0,0179 \text{ u} \cdot 931 \text{ MeV/u} = 16,7 \text{ MeV}$$

25. Durante el proceso de fisión de un núcleo de  ${}^{235}_{92}\text{U}$  por un neutrón se liberan 198 MeV. Calcula la energía liberada al fisionarse 1 kg de uranio.

N.º de núcleos de uranio:

$$N = \frac{m}{M} N_A = \frac{10^3 \text{ g} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}}{235 \text{ g mol}^{-1}} = 2,56 \cdot 10^{24} \text{ núcleos}$$

Energía:

$$E = 2,56 \cdot 10^{24} \text{ núcleos} \cdot 198 \text{ MeV/núcleo} = 5,07 \cdot 10^{26} \text{ MeV}$$

$$E = 5,07 \cdot 10^{26} \text{ MeV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J/MeV} =$$

$$= 8,1 \cdot 10^{13} \text{ J} = 8,1 \cdot 10^{10} \text{ kJ}$$

26. ¿Qué cantidad de energía se libera en la reacción de fusión  $2 {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He}$ ?

Datos: masa del hidrógeno-2 = 2,0141 u; masa del helio-4 = 4,0026 u.

- a) El defecto de masa de la reacción es:

$$\Delta m = 2 \cdot 2,0141 \text{ u} - 4,0026 \text{ u} = 0,0256 \text{ u}$$

Energía liberada:

$$E = 0,0256 \text{ u} \cdot 931 \text{ MeV/u} = 23,8 \text{ MeV}$$

- b) Para unir dos núcleos hay que vencer las fuerzas eléctricas de repulsión que existen entre las cargas positivas de los protones. Para conseguirlo, los núcleos deben chocar entre sí a velocidades suficientemente altas como para vencer la repulsión, lo que requiere temperaturas de varios cientos de millones de grados.

27. ¿Qué misión cumple el moderador en un reactor nuclear?

Frena los neutrones rápidos procedentes de la fisión nuclear.

28. ¿Qué es un reactor reproductor? ¿Qué ventajas e inconvenientes presenta?

Es un reactor diseñado para producir más plutonio-239 que el uranio-235 que consume. Permiten producir material fisionable, pero esta producción es difícil de controlar y puede utilizarse en la fabricación de armas nucleares.

29. ¿Qué ventajas presenta la obtención de energía por fusión nuclear frente a la obtenida mediante procesos de fisión nuclear?

La materia prima (deuterio y tritio) es abundante y barata. Los reactores de fusión presentarán menos problemas con los residuos radiactivos que los de fisión y serán más seguros.

30. En un reactor nuclear se detecta una pérdida de masa de 54,0 g. Calcula cuántos kWh de energía se habrán producido.

La energía producida según la ecuación de Einstein es la siguiente:

$$E = \Delta m c^2 = 5,4 \cdot 10^{-2} \text{ kg} (3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1})^2 = 4,9 \cdot 10^{15} \text{ J}$$

$$E = \frac{4,9 \cdot 10^{15} \text{ J}}{3,6 \cdot 10^6 \text{ J/kWh}} = 1,35 \cdot 10^9 \text{ kWh}$$

## Partículas y fuerzas fundamentales

31. La carga del electrón se ha considerado durante mucho tiempo como la unidad natural de carga eléctrica. ¿Te parece lógico mantener este criterio?

Se pensaba que la carga del electrón era la más pequeña que podía existir. Tras el descubrimiento de los quarks, no parece lógico mantener este criterio.

32. Compara cualitativamente las cuatro interacciones fundamentales de la naturaleza en función de las energías involucradas.

La interacción nuclear fuerte es la más intensa, pero de muy corto alcance, no se aprecia fuera del núcleo. Afecta a los quarks y mantiene unidos los protones y los neutrones que componen el núcleo de los átomos.

La interacción electromagnética es la segunda en intensidad. Actúa sobre partículas cargadas eléctricamente y puede ser atractiva o repulsiva. Es la responsable de que los átomos, las moléculas y la materia en general sean estables.



La interacción nuclear débil es la responsable de la desintegración beta de los núcleos atómicos y las transformaciones entre leptones. Tiene un radio de acción muy corto, sólo en el interior del núcleo, y es más débil que la interacción electromagnética.

La interacción gravitatoria es la más débil de todas, es atractiva entre todas las masas y es la responsable de la estructura general del Universo.

### 33. ¿Qué relación existe entre el bosón de Higgs y la materia?

La masa surge de la interacción de las partículas elementales con el campo de Higgs, cuya partícula asociada es el bosón de Higgs. Cuanto mayor es la interacción de una partícula elemental con el campo de Higgs, mayor es la masa de la partícula.

### 34. a) ¿Qué función realizan las partículas portadoras de fuerzas? ¿Cuáles son estas partículas?

b) ¿Sobre qué partículas materiales actúan los gluones?

c) Según la Teoría de las Supercuerdas, ¿qué relación existe entre el modelo de vibración de la cuerda y la fuerza gravitatoria?

d) ¿Qué dice el Principio antrópico?

a) Las partículas portadoras de fuerza transmiten las interacciones entre las partículas de materia. Son: fotones, partículas  $W$  y  $Z$ , gluones y gravitones.

b) Los gluones transmiten la interacción nuclear fuerte que mantiene unidos a los protones y neutrones en el interior del núcleo atómico.

c) Cuanto mayor sea la amplitud y la frecuencia de vibración de la cuerda, mayor es la energía y, por tanto, mayor será la masa, de acuerdo con la relación relativista entre masa y energía, y es la masa la que determina las propiedades gravitatorias.

d) El Universo debe resultar adecuado para que exista vida inteligente.

## ■ Aplicaciones de los isótopos radiactivos

### 35. Comenta la siguiente frase: «Debido a la desintegración del carbono-14, cuando un ser vivo muere se pone en marcha un reloj».

Cuando un ser vivo muere su concentración de carbono-14 va disminuyendo con el tiempo.

Este hecho permite determinar el tiempo transcurrido desde su muerte.

### 36. Se ha medido la actividad de una muestra de madera prehistórica, observándose que se desintegran 90 átomos/hora, cuando en una muestra actual de la misma naturaleza la tasa de desintegración es de 700 átomos/hora. Calcula la antigüedad de la madera. El periodo de semidesintegración del carbono-14 es de 5730 años.

De acuerdo con la ecuación fundamental de la radiactividad y el concepto de actividad, se cumple:

$$\frac{A_0}{A} = \frac{N_0 \lambda}{N \lambda} = \frac{N_0}{N_0 e^{-\lambda t}} = e^{\lambda t}$$

$$\lambda t = L \frac{A_0}{A}; \quad t = \frac{1}{\lambda} L \frac{A_0}{A}$$

La constante de desintegración se obtiene a partir del periodo de semidesintegración:

$$\lambda = \frac{L 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{5730 \text{ años}} = 1,21 \cdot 10^{-4} \text{ años}^{-1}$$

El tiempo transcurrido se obtiene a partir de la ecuación anterior:

$$t = \frac{1}{1,21 \cdot 10^{-4} \text{ años}^{-1}} L \left( \frac{700}{90} \right) = 1,69 \cdot 10^4 \text{ años}$$

### 37. Los restos de un animal encontrados en un yacimiento arqueológico tienen una actividad radiactiva de 2,6 desintegraciones por minuto y gramo de carbono. Calcula el tiempo transcurrido, aproximadamente, desde la muerte del animal.

Datos: la actividad del carbono-14 en los seres vivos es de 15 desintegraciones por minuto y por gramo de carbono.  $T_{1/2}$  5730 años.

La ecuación fundamental de la radiactividad en función de la actividad es:

$$A = A_0 e^{-\lambda t}; \quad \frac{A}{A_0} = e^{-\lambda t}$$

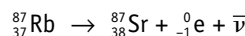
Si se tiene en cuenta la relación existente entre la constante de desintegración y el periodo de semidesintegración, al aplicar logaritmos neperianos, resulta lo siguiente:

$$L \frac{A}{A_0} = -\lambda t; \quad L \frac{A}{A_0} = -\frac{0,693 t}{T_{1/2}}$$

$$L \frac{2,6}{15} = -\frac{0,693 t}{5730 \text{ años}}; \quad t \approx 14500 \text{ años}$$

## ■ Aplica lo aprendido

### 38. Debido a la desintegración beta del rubidio-87, los minerales de rubidio contienen estroncio. Se analizó un mineral y se comprobó que contenía el 0,85 % de rubidio y el 0,0089 % de estroncio. Suponiendo que todo el estroncio procede de la desintegración del rubidio y que el periodo de semidesintegración de este es $5,7 \cdot 10^{10}$ años, calcula la edad del mineral. (Solo el 27,8 % del rubidio natural es rubidio-87.)



Si consideramos 100 g de mineral, existirán 0,85 g de rubidio, de los que solo el 27,8 % es rubidio-87.

Masa de rubidio: 87,  $0,85 \cdot 0,278 \text{ g} = 0,2363 \text{ g}$ .

Como se han formado 0,0089 g de estroncio-87, se han desintegrado 0,0089 g de rubidio-87, luego inicialmente la muestra contenía  $0,2363 \text{ g} + 0,0089 \text{ g} = 0,2454 \text{ g}$  de rubidio-87.

$$m = m_0 \cdot e^{-\lambda t}; \quad L \left( \frac{m}{m_0} \right) = -\frac{0,693 t}{T_{1/2}}$$

$$L \frac{0,2363}{0,2454} = -\frac{0,693 t}{5,7 \cdot 10^{10} \text{ años}}; \quad t \approx 3 \cdot 10^9 \text{ años}$$



39. La energía desprendida en la fisión de un núcleo de uranio-235 es aproximadamente de 200 MeV. ¿Cuántos kilogramos de carbón habría que quemar para obtener la misma cantidad de energía que la desprendida por fisión de 1 kg de uranio-235? El calor de combustión del carbón es de unas 7 000 kcal/kg.

Número de núcleos existentes en 1 000 g de uranio-235:

$$\frac{1000 \text{ g} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ núcleos/mol}}{235 \text{ g mol}^{-1}} = 2,56 \cdot 10^{24} \text{ núcleos}$$

Energía desprendida en la fisión:

$$E = 2,56 \cdot 10^{24} \text{ núcleos} \cdot 200 \text{ MeV/núcleo} = 5,12 \cdot 10^{26} \text{ MeV} = 5,12 \cdot 10^{32} \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV} = 8,19 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

Energía desprendida en la combustión del carbón:

$$7000 \text{ kcal/kg} \cdot 4,18 \text{ kJ/kcal} = 2,92 \cdot 10^4 \text{ kJ/kg}$$

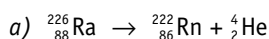
$$\frac{1 \text{ kg}}{2,92 \cdot 10^7 \text{ J}} = \frac{x}{8,19 \cdot 10^{13} \text{ J}}; \quad x = 2,8 \cdot 10^6 \text{ kg}$$

40. Cuando un núcleo de  $^{226}_{88}\text{Ra}$  emite una partícula alfa se convierte en un núcleo de radón (Rn).

a) Escribe la ecuación del proceso nuclear correspondiente.

b) Suponiendo que toda la energía generada en el proceso se transfiere a la partícula alfa, calcula su energía cinética y su velocidad.

Datos:  $m_{\text{Ra}} = 226,025406 \text{ u}$ ;  $m_{\text{Rn}} = 222,017574 \text{ u}$ ;  
 $m_{\alpha} = 4,002603 \text{ u}$ .



b)  $\Delta m = m_{\text{Ra}} - (m_{\text{Rn}} + m_{\alpha}) = 226,025406 \text{ u} - (222,017574 \text{ u} + 4,002603 \text{ u}) = 0,005229 \text{ u}$

$$E_c = \Delta m c^2 = 0,005229 \text{ u} \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg/u} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1})^2 = 7,8 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 7,8 \cdot 10^{-13} \text{ J}}{4,002603 \text{ u} \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg/u}}} = 1,5 \cdot 10^7 \text{ m s}^{-1}$$

41. Una central nuclear, de 800 MW de potencia, utiliza como combustible uranio enriquecido hasta el 3 % del isótopo fisiónable. ¿Cuántas fisiones por segundo deben producirse? ¿Cuántas toneladas de combustible consumirá en un año? Se supone que en la fisión de un núcleo de uranio 235 se liberan 200 MeV.

Energía liberada en cada fisión:

$$2 \cdot 10^8 \text{ eV} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV} = 3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

N.º de fisiones por segundo:

$$\frac{8 \cdot 10^8 \text{ J s}^{-1}}{3,2 \cdot 10^{-11} \text{ J/fisión}} = 2,5 \cdot 10^{19} \text{ fisiones/s}$$

Como la riqueza del uranio-235 es solo del 3 %, el número de núcleos de uranio necesarios por segundo es:

$$\frac{100}{3} = \frac{x}{2,5 \cdot 10^{19}}; \quad x = 8,33 \cdot 10^{20} \text{ núcleos/s}$$

Como la masa atómica del uranio es aproximadamente 238u, la masa del uranio consumida en 1 s es:

$$8,33 \cdot 10^{20} \text{ núcleos/s} \cdot 238 \text{ u/núcleo} \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg/u} = 3,29 \cdot 10^{-4} \text{ kg s}^{-1}$$

El consumo total en un año es:

$$m = 3,29 \cdot 10^{-4} \text{ kg s}^{-1} \cdot (365 \cdot 24 \cdot 3600) \text{ s} = 10400 \text{ kg}$$

42. Un electrón y un positrón se aniquilan mutuamente y se produce un rayo gamma. ¿Cuál es la frecuencia y la longitud de onda de la radiación obtenida?

Datos: masa del electrón =  $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ ;  
 $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ .

$$e^- + e^+ = \gamma$$

La energía del electrón y el positrón ( $2m_e c^2$ ) será igual a la energía del fotón ( $hf$ ):

$$2m_e c^2 = hf$$

$$f = \frac{2m_e c^2}{h} = \frac{2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1})^2}{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J s}} = 2,5 \cdot 10^{20} \text{ Hz}$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}}{2,5 \cdot 10^{20} \text{ s}^{-1}} = 1,21 \cdot 10^{-12} \text{ m}$$