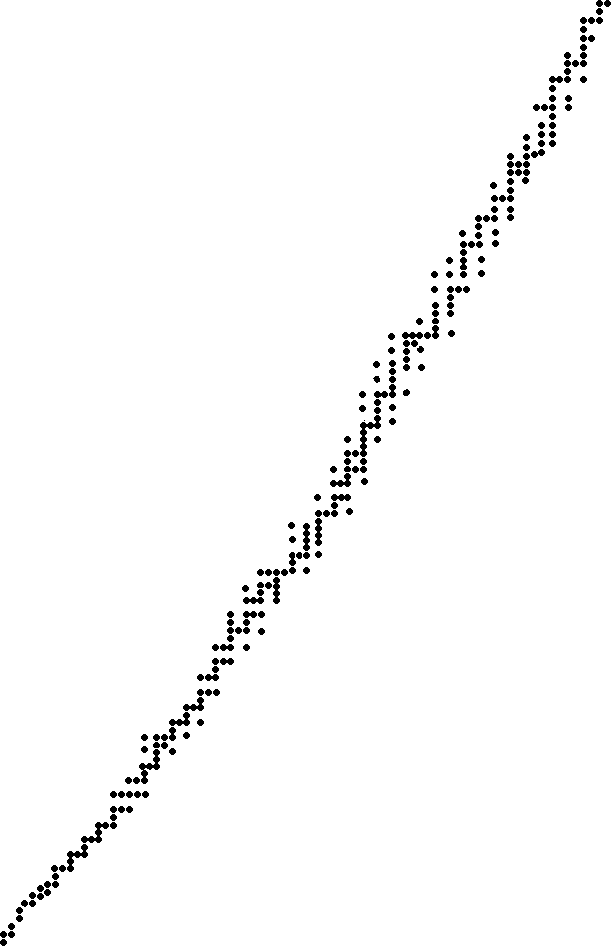
1. Química Nuclear
   1. La estabilidad de los núcleos atómicos
   2. Radiactividad. Series radiactivas. Velocidad de desintegración
   3. Efectos biológicos de la radiactividad
   4. Nucleosíntesis
   5. Fisión nuclear
   6. Fusión nuclear
   7. Aplicaciones: trazadores radiactivos y datación

# La estabilidad de los núcleos atómicos

Los nucleones están enlazados en el núcleo por una fuerza atractiva *extremadamente fuerte en distancias cortas* que vence la repulsión electrostática entre los protones. La proporción entre el número de neutro- nes y el de protones y el tamaño de un núcleo influyen en su estabilidad, y, por tanto, en su reactividad.

***La banda de estabilidad.*** Existe una relación entre la estabilidad de un núcleo y la proporción neutrón– protón, como se observa en la gráfica de la figura 2.1, que recoge los 157 *nucleidos* estables (un *nucleido* es cada una de las formas atómicas de *los* elementos, en contraste con “isótopo” que se refiere únicamente a formas atómicas distintas de *un* elemento).

Banda de



120

100

Número de neutrones

80

60

40

20

*n*/*p* = 1,5

*n*/*p* = 1,4

*n*/*p* = 1,2

estabilidad

Neutrones/Protones = 1

**Figura 2.1.** Gráfica del número de neutrones frente al número de protones en los 157 núcleos estables conocidos. Cuando se eleva el número atómico, los núcleos estables presentan una mayor relación neutrones/protones. El área donde se localizan los núcleos estables se denomina banda de estabilidad. La mayoría de los núcleos inestables se sitúan fuera de dicha banda. Todos los

0 20 40 60 80 83

Número de protones

núcleos de *Z* >83 son inestables.

Los núcleos situados fuera de la banda de estabilidad son inestables y se descomponen, emitiendo

*radiactividad*, hasta convertirse en núcleos con una relación neutrón–protón adecuada.

***La energía de enlace.*** La estabilidad de un núcleo viene dada por su *energía de enlace nuclear*, que es la energía desprendida cuando *Z* protones y *A–Z* neutrones se juntan para formar un núcleo. Esta energía se calcula a partir de la diferencia másica entre los nucleones libres y el núcleo formado, aplicando la ecuación de Einstein, *E* = *mc*2. La *energía de enlace por nucleón* permite comparar la estabilidad de

núcleos distintos (figura 2.2). Energéticamente es favorable la *fusión* de los núcleos muy ligeros para dar núcleos más pesados y la *fisión* de los núcleos muy pesados para dar dar núcleos más ligeros.

10

56 Fe

26

Energía de enlace por nucleón (en MeV/nucleón)

1 MeV = 1,60 10 –13J

5

00 50

100

150

200

250

**Figura 2.2.** Gráfica de la energía de enlace por nucleón frente al número de nucleones. Los núcleos muy ligeros y muy pesados son relativamente inestables. El núcleo más estable es el del hierro–56.

Número de nucleones, *A*

# Radiactividad. Series radiactivas. Velocidad de desintegración

***Tipos de radiactividad.*** Los núcleos fuera de la banda de estabilidad son *radiactivos*, es decir, se descomponen (se *desintegran*) liberando diferentes tipos de partículas o de radiación electromagnética. La *radiactividad* fue accidentalmente descubierta en 1896 por Becquerel, al trabajar con óxido de uranio. Rutherford identificó tres tipos de radiactividad (,  y ) pero ahora se conocen muchos más (tabla 2.1).

2 2 82

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***Tabla 2.1. Tipo*** | ***Tipos comunes de radiactividad Símbolo Identidad*** | | ***Z*** | ***A*** | ***Ejemplos*** |  |
| Alfa | , 4, 4He2+ | Núcleo de helio | –2 | –4 | 204Pb  200Hg + 4He | (**1**) |
|  |  |  |  |  | 226Ra  222Rn + 4He | (**2**) |

88

80 2

86 2

Beta

, –, 0, 0e

Electrón +1 0

24Na  24Mg + 0e

(**3**)

Gamma

–1 –1

, 0

0

Radiación electromag– nética de alta energía

11 12 –1

Positrón

0 0

Neutrón

+, 0, 0e

n, 1n

+1 +1

Electrón de carga +

Neutrón

–1 0

0 –1

43Ti  43Sc + 0

17N  16N + 1n

22 21 +1

(**4**)

(**5**)

Protón

0

p, 1p, 1H 1+

Núcleo de hidrógeno–1

–1 –1

7 7 0

1 1

Captura K

Captura de un electrón –1 0

44Ti + 0e  44Sc

(**6**)

22 –1 21

El resultado de la emisión de partículas es una *transmutación nuclear*. El nuevo núcleo formado puede estar en un estado excitado. La reordenación del núcleo excitado a un nivel de más baja energía produce la radiación  que es una radiación electromagnética cuya frecuencia viene dada por *E* = *h* (ver tema 3) ***Predicción del tipo de desintegración.*** Los núcleos situados por encima de la banda de estabilidad (ricos en neutrones) emiten partículas  (ejemplo **3**) o, con menos frecuencia, neutrones (**5**).

Los núcleos situados por debajo de la banda de estabilidad (ricos en protones), emiten partículas +

(**4**) o captan electrones (**6**). Algunos núcleos, en especial los más pesados, experimentan emisión  (**1**).

Todos los nucleidos de *Z* > 83 están fuera de la banda de estabilidad y son radiactivos. La mayoría se desintegran por emisión  (**2**) aunque algunos lo hacen por emisión , + o captura K. Algunos isóto- pos del uranio (*Z* = 92) y elementos de mayor número atómico se desintegran por fisión nuclear (ver 2.5). ***Series radiactivas.*** Cuando una desintegración produce un núcleo a su vez inestable, ésta prosigue dando una *serie radiactiva*. Hay tres series radiactivas *naturales*, serie del uranio–238 (fig. 2.3), serie del uranio–235 y serie del torio–232, en las que las emisiones , alternadas a veces con emisiones , acaban en un isótopo estable del plomo (*Z* = 82).

***Velocidad de desintegración.*** La *velocidad de desintegración* o *actividad* (*v*) de una muestra depende del número de partículas (*N*): *v* = *–dN/dt* = *kN*. La *constante de desintegración* (*k*) es diferente para cada radionucleido y es independiente de la temperatura, del estado físico de la muestra y del compuesto del que forma parte.

238

234

230

Número másico, *A*

226

222

218

214

210

206

81 82 83

84 85 86 87 88 89 90 91 92

Número atómico, *Z*

**Figura 2.3.** Serie radiactiva natural del uranio–238. La serie termina en el plomo–206. Se dan los tiempos de semidesintegración de cada núcleo (a = años, d

= días, m = minutos, s = segundos).

Clave

Emisión 

Ra

Rn

Emisión 

Po At

Th 24 d

Th 104a

U 109a

Pa U

1,2 m 105a

Ra 1622 a

Rn 3,8 d

Tl 1,3 m

Tl

Pb 27 m

Pb 21 a

Pb

Po At 3,0 m 1,4 s

Bi Po 20 m 164 µs

Bi 5 d

Po 138 d

4,2 m estable

Si *No* es el número de partículas iniciales, el número *N* de partículas sin desintegrar tras un tiempo *t* viene dado ln(*N*/*No*) = –*kt*. El *periodo de desintegración* o *vida media* (*t1/2*) es el tiempo necesario para que la cantidad de muestra se reduzca a la mitad, y viene dado por la ecuación *t1/2* = 0,693/*k*.

# Efectos biológicos de la radiactividad

Las partículas  son poco penetrantes pero muy dañinas por sus fuertes impactos. La radiación  es más penetrante. La radiación  es muy penetrante y dañina por su carácter ionizante.

La intensidad de una radiación depende de su *actividad*, número de desintegraciones por unidad de tiempo. La unidad del SI es el el *becquerel* (Bq) que equivale a 1 desintegración por segundo. Otra unidad habitual es el *curie* (Ci) que equivale a 3,7 1010 desintegraciones por segundo. El *contador*

*Geiger* (fig. 2.4) permite medir la *actividad* de una muestra radiactiva.



molécula de gas

MEDIDOR

trayectoria de una radiación

+

–

e

+

ventana de mica

**Figura 2.4.** Contador Geiger. El alambre central tiene carga positiva y la capa del tubo tiene carga negativa. Cuando la radiación penetra a travésde la ventana, ioniza uno o más átomos gaseosos. Los electrones son atraídos al alambre central y los iones positivos hacia la capa. Esto da lugar a una pulsación de corriente eléctrica que se puede convertir en un*beep* audible por un altavoz o en cualquier otra forma que permita su medida. El contador sólo puede detectar la radiación y  . Las partículas  no pueden penetrar por la ventana.

Una *dosis* de radiación es la energía por unidad de masa depositada en una muestra que ha sido expuesta a la radiación. Su unidad del SI es el *gray* (Gy) que equivale a 1 J kg–1. Otra unidad habitual es el *rad* que equivale a 10–2 J kg–1.

El *factor de efectividad biológica relativa* (*Q*) mide el efecto dañino de un tipo de radiación en un tipo de tejido. Se toma arbitrariamente *Q* 1 para las radiaciones  y , con lo que *Q* 20, para la .

El *equivalente dosis* es el producto de la dosis por *Q*. La unidad del SI es el *sievert* (Sv) que

equivale a 1 J kg–1. Otra unidad es el *rem* que equivale a 10–2 J kg–1.

***Tabla 2.2. Efecto biológico de la radiación Rem Efecto***

0 a 25 No observable

25 a 50 Descenso en los glóbulos blancos

100 a 200 Náuseas, marcado descenso de los glóbulos blancos

500 50% de posibilidades de morir en 30 días

# Nucleosíntesis

La nucleosíntesis es el proceso de formación de un elemento por transmutación. Se puede inducir artifi- cialmente mediante *reacciones de bombardeo*, la primera de las cuales la realizó Rutherford en 1915:

14N + 4He  18F  17O + 1H

7 2 9 8 1

Una reacción de bombardeo suele abreviarse 14N(,p)17O, en donde se escriben, de izquierda a derecha,

7 8

el núcleo del blanco, la partícula de bombardeo, la partícula desprendida y el núcleo final obtenido. ***Aceleradores de partículas.*** Las reacciones de bombardeo han permitido la síntesis de los 4 elementos “faltantes” entre los primeros 92 elementos: tecnecio, promecio, astato y francio. Sobretodo cuando se bombardea con partículas de carga positiva, se precisa que éstas tengan una gran velocidad, para lo cual se han construido grandes aceleradores de partículas (*ciclotrones*, *sincrotrones* o *aceleradores lineales*).

# Fisión nuclear

La *fisión nuclear* se diferencia de la *radiactividad* en que el proceso de división del núcleo es en otros dos de masa considerable. Algunas fisiones son *espontáneas* mientras que otras son *inducidas* mediante bombardeo. La facilidad con la que se fisiona un núcleo aumenta con su tamaño:

* + - Todos los elementos de *Z* 80 tienen algún isótopo fisionable siempre que se bombardee a alta energía.
    - Los núcleos de *Z* = 89 a 98 se fisionan espontáneamente con vidas medias de 104 a 107 años.
    - Los núcleos de *Z* 98 se fisionan espontáneamente con vidas medias de milisegundos a días.

# Fusión nuclear

Las reacciones de fusión de núcleos ligeros son la fuente de energía del sol. La fusión de dos núcleos debe vencer la fuerte repulsión electrostática entre sus cargas positivas, por lo que las energías de activación de estas reacciones son extremadamente altas. La fusión de menor energía de activación se inicia a temperaturas de 40 millones de K. Esto dificulta el objetivo de realizar de reacciones controladas de fusión para obtener energía, lo que constituye un reto tecnológico y científico de primer orden.

# Aplicaciones: trazadores radiactivos y datación

Además del uso militar de la fusión y de la fisión, y de la obtención de energía eléctrica a partir reacciones de fusión, existen otras aplicaciones de la química nuclear entre las que destacaremos: ***Trazadores radiactivos:*** son de gran uso en campos como la medicina o la química.

***Datación:*** hay aplicaciones en geología (edad de las rocas) y en arqueología (datación del carbono–14).

# Bibliografía

Atkins, págs. 801–836; Dickerson, págs. 892–924; Masterton, págs. 744–770; Russell, págs. 713–734;

Whitten, págs. 801–830

# Bibliografía complementaria

1 R. Herman, “Fusión. La búsqueda de la energía eterna”, McGraw–Hill, Madrid.

# Seminarios

* 1. ¿En qué se diferencian las reacciones nucleares de las reacciones químicas ordinarias?
  2. Define: energía de enlace, energía de enlace por nucleón, radiactividad, transmutación nuclear, serie

radiactiva, periodo de desintegración, actividad, dosis, fusión y fisión.

* 1. ¿Por qué es el hierro tan abundante en el universo?
  2. En una de las series naturales de desintegración radiactiva, el uranio–235 (235

U) se desintegra con

emisión de partículas  y  para formar finalmente plomo–207 (207

92

Pb). ¿Cuántas partículas  y  se

82

emiten por átomo de plomo–207 formado?

* 1. ¿Cuáles de las siguientes transmutaciones no suponen emisión de partículas ?

a) 64Cu  64Ni; b) 124Sb  124Te; c) 212Bi  212Po; d) 234Th  234Pa; e) 114In  114Sn.

29 28

51 52

83 84

90 91

49 50

* 1. Sugiere el tipo de desintegración que sufrirán los siguientes núcleos:
     1. berilio–10; b) nitrógeno–12; c) cobre–68; d) cobre–60; e) bromo–87; f) bromo–74; g) cadmio–103;

h) xenon–140; i) plutonio–232; j) plutonio–246; k) americio–246.

* 1. ¿Por qué tardan el mismo tiempo en desintegrarse 10 g de una sustancia hasta 5 g, que 1 g hasta 0,5 g?
  2. ¿Cuál de las reacciones nucleares inducidas que se proponen *no* da el producto mencionado?:

a) 10B(,n)13N; b) 14N(n,p)14C; c) 28Si(,n)29P; d) 242Cm(,2n)243Bk.

5 7 7

6 14

15 96 97

* 1. Completa las siguientes ecuaciones nucleares y escríbelas en forma de “ecuación química”:

a) 20Ne(,?)16O; b) 44Ca(?,2H)48Ti; c) 27Al(2H,?)28Al.

10 8

20 1 22

13 1 13

* 1. Completa las siguientes reacciones nucleares y escríbelas en forma abreviada:

a) 59Co +  56Mn + 4He; b) 2H +  4He + 1n; c) 124Sb  124Te + .

27 25 2 1 2 0 51 52

* 1. ¿En qué se diferencia la fisión de la radiactividad?
  2. ¿Por qué no es posible aplicar el método del carbono–14 para determinar la edad geológica de un mineral?

# Problemas

**energía media de enlace nuclear**

* 1. Calcula la energía de enlace por nucleón del 55 Mn. [*m*(n) = 1,00867 u, *m*(p) = 1,00728 u,

25

*m*(e) = 0,000549 u, *m*(55Mn) = 54,9381 u, 1 MeV = 1,60 10–13 J].

* 1. Conociendo las masas de las partículas neutrón, electrón y protón [*m*(e) = 0,000549 u, *m*(n) = 1,00867 u, *m*(p) = 1,00728 u], la constante de Avogadro (*N*A = 6,022 1023 mol–1) y la velocidad de la luz (*c* = 3,00 108 m s–1), calcula la energía media de enlace para los núcleos
     1. 24

Mg (masa isotópica del magnesio–24 = 23,9850 u).

12

* + 1. 41

K (masa isotópica del potasio–41 = 40,9618 u).

19

c) 194

Pt (masa isotópica del platino–194 = 193,9627 u).

78

2.3 Sabiendo que *m*(n) = 1,00867 u, *m*(p) = 1,00728 u, *m*(e) = 0,000549 u, calcula:

1. la masa isotópica del 51 V si su energía media de enlace es igual a 7,1408 10–11J.

23

1. la masa isotópica de 94 Zr sabiendo que su energía media de enlace por nucleón es 1,3885 10–12 J.

40

**energía y masa en las reacciones nucleares**

* 1. Calcula la energía liberada por átomo y la energía liberada por mol, en las siguientes reacciones nucleares (*m*(n) = 1,00867 u, *m*(e) = 0,000549 u):

a) 6 He  6 Li + – *m*(6 He) = 6,01888 u; *m*(6 Li) = 6,01512 u

2 3 2 3

b) 8 He  7 Li + – + 1 n *m*(8 He) = 8,0375 u; *m*(7 Li) = 7,01600 u

2 3 0 2 3

* 1. Calcula la masa isotópica del sodio–21 si en el proceso 21Na  21Ne + + se desprenden 5,67 10–13 julios por partícula desintegrada [*m*(21Ne) = 20,99384 u, *m*(e) = 0,000549 u, *c* = 3,00 108 m s–1].
  2. Calcula la energía para el proceso de desintegración de un núcleo de fósforo–32 en azufre–32, sabiendo que las masas isotópicas respectivas son 31,9739 u y 31,9721 u. ¿Cuál es la energía desprendida por mol de fósforo–32?
  3. Un combustible que se ha propuesto para la fusión nuclear controlada es el deuteruro de litio, LiD (siendo D = 2H). ¿Cuál de las siguientes reacciones contribuiría posiblemente a la producción de energía?

a) 6Li + 1n  4He + 3H; b) 6Li + 2H  24He; c) 22H  3He + 1n

[*m*(1n) = 1,00867 u, *m*(2H) = 2,01410 u, *m*(3H) = 3,01605 u, *m*(3He) = 3,01603 u, *m*(4He) = 4,00260 u,

*m*(6Li) = 6,01513 u].

* 1. En uno de sus modos de descomposición, el uranio–238 (*Z* = 92, *M*r = 238,0508) emite una partícula  (*M*r = 4,00260) con una energía cinética de 4,13 MeV (1 MeV = 1,60 10–13 J), además de radiación  para dar torio–234 (*Z* = 90, *M*r = 234,0436). Calcula la longitud de onda de la radiación  emitida [*h* = 6,626 10–34 J s, *c* = 3,00 108 m s–1].

**velocidad de desintegración, actividad radiactiva**

* 1. Uno de los productos de fisión que se encuentra en el “polvo” radioactivo procedente de la explosión de una bomba atómica es el estroncio–90. Una muestra pura de estroncio–90 proporciona una actividad de 1000 desintegraciones por minuto. Si la actividad de la muestra después de 1,00 años es 975,2 desintegraciones min–1, ¿cuál es su periodo de desintegración?
  2. El tiempo de semidesintegración (*t*1/2) del torio–234 es 24,1 d. Calcula su constante de desintegración (*k*).
  3. El radón–222 tiene un período de desintegración de 3,82 d. Calcula el tiempo que tarda una muestra de l0,0 g de radón–222 en reducirse a l,00 g.
  4. El período de desintegración del 221Rn es 25,0 min. ¿Qué cantidad de 221Rn quedará sin desintegrar de

una muestra de 100 mg al cabo de 2h?

* 1. Calcula el tiempo necesario para que una muestra de 246Cm (*t*1/2 = 5,5 103 años) reduzca su actividad radiactiva a la décima parte.
  2. El 95,0% de una cierta cantidad de 106Rh se desintegra en 562 min. Determina su período de desintegración.
  3. De acuerdo a las regulaciones de la Comisión de Energía Atómica de los EEUU, la máxima dosis

permisible de estroncio–90 (*t*1/2 = 27,6 a) en el cuerpo de un adulto es de l,00 microcuries (1 C = 1 10–6 C) aproximadamente. ¿A qué masa de estroncio–90 corresponde esta dosis máxima?.

* 1. Un contador Geiger dado, hace un *bip* por cada 1000 partículas emitidas por una muestra. Calcula la actividad de la muestra (en curies)
     1. si hace 370 *bips* cada 10 segundos; b) si hace 1000 *bips* cada 100 segundos.
  2. Una muestra de 1,0 kg absorbe 1,0 J de energía como resultado de una exposición a una radiación . Calcula la dosis en rad y el equivalente de dosis en rem (*Q* para la radiación   .
  3. Estima la actividad de una fuente de 1,0 milicuries de radon–222 (*t*1/2 = 3,82 días) después de dos semanas.

**datación**

* 1. Una muestra de carbón de madera procedente de un tronco de ciprés de la tumba de un rey egipcio tiene una relación carbono–14/carbono–12 que es el 54,2% de la que presenta el carbono actual. ¿Cuál es la fecha probable de la muerte del rey?. El periodo de desintegración del carbono–14 es 5670 años.
  2. Una muestra de uranita contiene 0,124 g de plomo–206 por cada gramo de uranio–238. Si el periodo de desintegración del uranio–238 es 4,51 109 años, ¿cuánto tiempo ha transcurrido desde la formación geológica del mineral?.
  3. En un mineral de uranio se determinó un contenido en 206Pb de 0,252 gramos por cada gramo de 238U

presente. Calcula la edad del mineral de uranio si el periodo de desintegración del 238U es 4,51 109 años.

* 1. La relación 14C/12C en un carbón es el 25,4% de la que existe en la actualidad en el CO2 atmosférico.

Calcula la edad de dicho carbón. El periodo de desintegración del 14C es 5730 años.

# Soluciones a los seminarios

* 1. Las reacciones nucleares afectan al núcleo de los átomos. Las fuerzas intervinientes (nucleares) son mucho mayores que las que intervienen en las reacciones químicas (electrostáticas) y, por tanto, las energías puestas en juego son muy superiores.
  2. Ver teoría.
  3. Porque está situado en la zona de mayor estabilidad nuclear (ver figura 2.2).
  4. Siete partículas y cuatro partículas .
  5. La a).
  6. ***Isótopo M*r*\* Inestable por Radiactividad prevista observada t*1/2**

Berilio–10 9,01 Exceso de n – – 2,5 106 años

Nitrógeno–12 14,007 Defecto de n +, Captura K + 0,011 s Cobre–68 63,5 Exceso de n – –,  30 s Cobre–60 63,5 Defecto de n +, Captura K +, Captura K,  23 min Bromo–87 79,9 Exceso de n – –, n,  55 s

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Bromo–74 | 79,9 | Defecto de n | +, Captura K | +, Captura K,  | 36 min |
| Cadmio–103 | 112,41 | Defecto de n | +, Captura K | +, Captura K | 10 min |

Xenon–140 131,29 Exceso de n – – 16 s Plutonio–232 244 Defecto de n +, Captura K,  Captura K,  36 min Plutonio–246 244 Exceso de n –,  – 10,9 d

Americio–246 243 Exceso de n –,  – 25,0 min

\* Masa relativa del elemento tomada de la tabla periódica, donde aparece la masa atómica relativa promedio natural (es decir de los isótopos más estables) o la masa del isótopo más estable para los elementos radiactivos.

* 1. En ambos casos se tarda un tiempo igual al periodo de semidesintegración, que es constante.
  2. En c) y la d), la suma de números atómicos y másicos no da el mismo resultado a la izquierda que a la derecha.
  3. a) 2 partículas ; b) núcleo de litio; c) un protón.
  4. a) neutrón; b) núcleo de tritio; c) electrón.
  5. Ver teoría.
  6. No se puede emplear para determinar la edad de un carbonato, por ejemplo, porque no procede de un organismo vivo (además, el método sólo es aplicable a escalas de unos miles de años).

# Soluciones a los problemas

2.1 *E* = 7,727 10–11 J = 482,0 MeV; 2.9 *t*1/2 = 27,6 a.

*E*media de enlace/*A* = 8,8 MeV por nucleón. 2.10 *k* = 0,0288 d–1.

2.2 a) 1,33 10–12 J por nucleón; b) 1,38 10–12 J por nucleón; 2.11 *t=* 12,7 d.

c) 1,27 10–12 J por nucleón. 2.12 3,59 mg.

2.3 a) 50,945 u; b) 93,908 u. 2.13 1,83 104 años.

2.4 a) *E* = 5,62 10–13 J = 3,50 MeV por átomo; 2.14 *t*1/2 = 130 min.

*E* = 3,38 1011 J = 9,39 104 kW h por mol; 2.15 *m* = 6,94 10–9 g.

b) *E* = 1,92 10–12 J = 12,0 MeV por átomo; 2.16 a) 1,0 10–6 Ci; b) 2,7 10–7 Ci.

*E* = 1,15 1012 J = 3,21 105 kW h por mol. 2.17 1,0 102 rad, 1,0 102 rem.

2.5 20,99873 u. 2.18 0,08 mCi.

2.6 *E* = 2,74 10–13 J = 1,710 MeV por átomo; 2.19 3 000 años a.C.

*E* = 1,65 1011 J por mol. 2.20 8,73 108 años.

2.7 Todas las reacciones son exotérmicas. a) *E* = 7,69 10–13 J; 2.21 1,68 109 años.

b) *E* = 3,59 10–12 J; c) *E* = 5,23 10–13 J. 2.22 11300 ± 100 años.

2.8  = 7,45 10–12 m.