

2 Química Nuclear

- 2.1 La estabilidad de los núcleos atómicos
- 2.2 Radiactividad. Series radiactivas. Velocidad de desintegración
- 2.3 Efectos biológicos de la radiactividad
- 2.4 Nucleosíntesis
- 2.5 Fisión nuclear
- 2.6 Fusión nuclear
- 2.7 Aplicaciones: trazadores radiactivos y datación

2.1 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 neutrones 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).

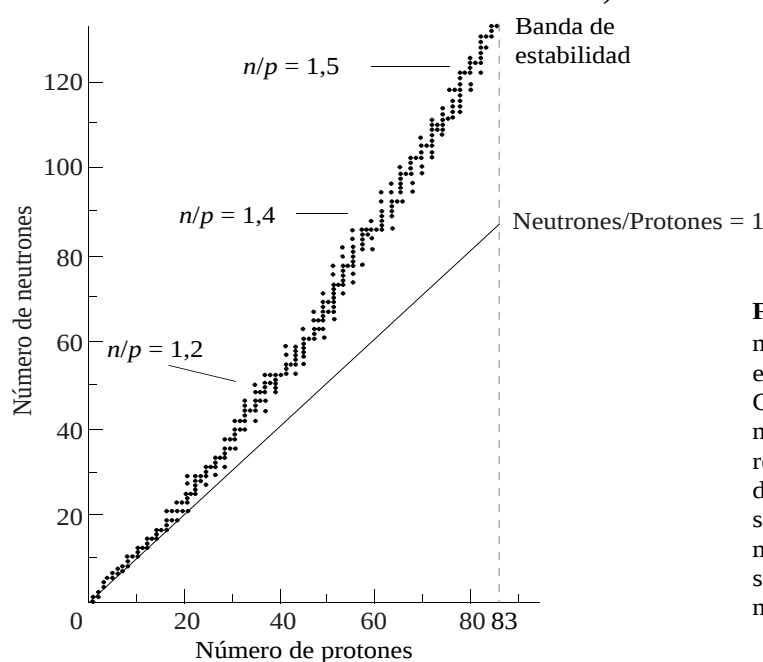


Figura 2.1. Gráfica del número de neutrones frente al número de protones en los 157 núcleos estables conocidos. Cuando se eleva el número atómico, los núcleos estables presentan una mayor relación neutrones/protones. El área donde se localizan los núcleos estables se denomina banda de estabilidad. La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

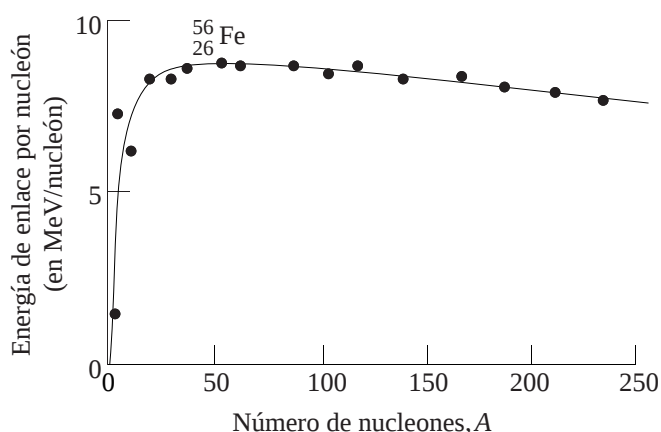


Figura 2.2. Gráfica de la energía de enlace por nucleón frente al número de nucleones. Los núcleos muy ligeros y muy pesados son relativamente inestables. El núcleo más estable es el del hierro-56.

2.2 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 (α , β y γ) pero ahora se conocen muchos más (tabla 2.1).

Tabla 2.1. Tipos comunes de radiactividad

Tipo	Símbolo	Identidad	ΔZ	ΔA	Ejemplos
Alfa	α , ${}^4_2\alpha$, ${}^4_2\text{He}^{2+}$	Núcleo de helio	-2	-4	${}^{204}_{82}\text{Pb} \rightarrow {}^{200}_{80}\text{Hg} + {}^4_2\text{He}$ (1) ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$ (2)
Beta	β , β^- , ${}^0_{-1}\beta$, ${}^0_{-1}\text{e}$	Electrón	+1	0	${}^{24}_{11}\text{Na} \rightarrow {}^{24}_{12}\text{Mg} + {}^0_{-1}\text{e}$ (3)
Gamma	γ , ${}^0_0\gamma$	Radiación electromagnética de alta energía	0	0	
Positrón	β^+ , ${}^0_{+1}\beta$, ${}^0_{+1}\text{e}$	Electrón de carga +	-1	0	${}^{43}_{22}\text{Ti} \rightarrow {}^{43}_{21}\text{Sc} + {}^0_{+1}\beta$ (4)
Neutrón	n , 1_0n	Neutrón	0	-1	${}^{17}_7\text{N} \rightarrow {}^{16}_7\text{N} + {}^1_0n$ (5)
Protón	p , 1_1p , ${}^1_1\text{H}^{1+}$	Núcleo de hidrógeno-1	-1	-1	
Captura K		Captura de un electrón	-1	0	${}^{44}_{22}\text{Ti} + {}^0_{-1}\text{e} \rightarrow {}^{44}_{21}\text{Sc}$ (6)

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 γ que es una radiación electromagnética cuya frecuencia viene dada por $E = h\nu$ (ver tema 3).

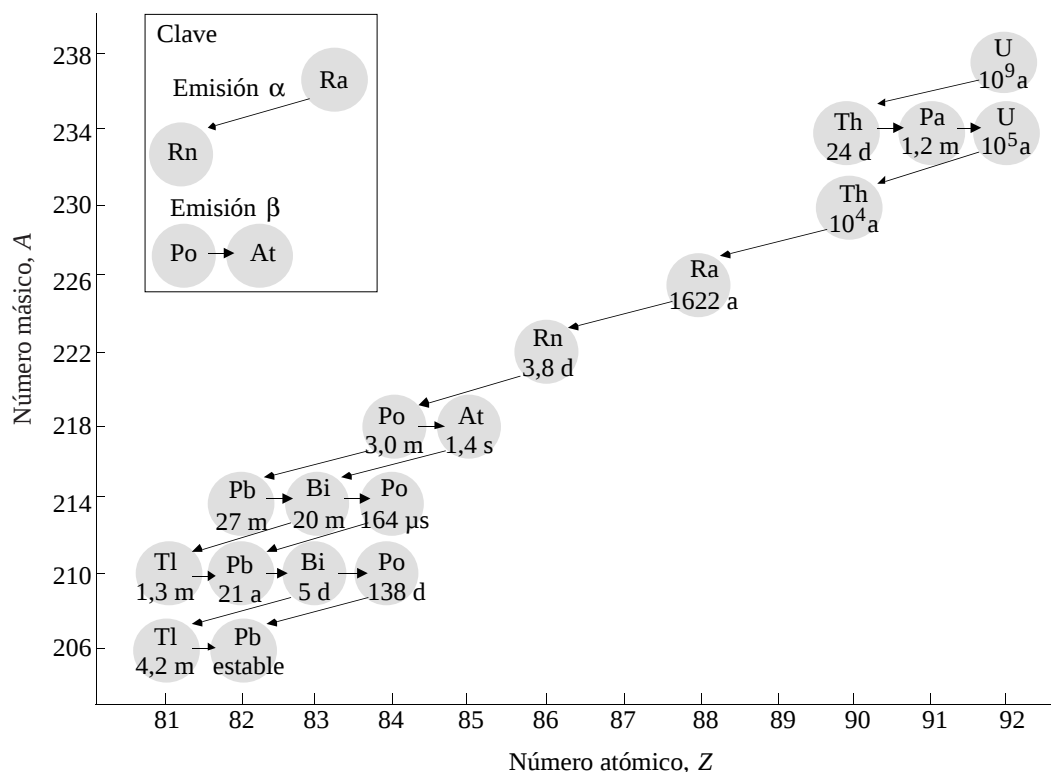
Predicción del tipo de desintegración. Los núcleos situados por encima de la banda de estabilidad (ricos en neutrones) emiten partículas β (ejemplo 3) o, con menos frecuencia, neutrones (5).

Los núcleos situados por debajo de la banda de estabilidad (ricos en protones), emiten partículas β^+ (4) o captan electrones (6). Algunos núcleos, en especial los más pesados, experimentan emisión α (1).

Todos los nucleidos de $Z > 83$ están fuera de la banda de estabilidad y son radiactivos. La mayoría se desintegran por emisión α (2) aunque algunos lo hacen por emisión β , β^+ o captura K. Algunos isótopos 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 α , alternadas a veces con emisiones β , acaban en un isótopo estable del plomo ($Z = 82$).

Velocidad de desintegración. La *velocidad de desintegración* o *actividad* (ν) de una muestra depende del número de partículas (N): $\nu = -dN/dt = kN$. 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.



Si N_0 es el número de partículas iniciales, el número N de partículas sin desintegrar tras un tiempo t viene dado $\ln(N/N_0) = -kt$. El *periodo de desintegración* o *vida media* ($t_{1/2}$) es el tiempo necesario para que la cantidad de muestra se reduzca a la mitad, y viene dado por la ecuación $t_{1/2} = 0,693/k$.

2.3 Efectos biológicos de la radiactividad

Las partículas α son poco penetrantes pero muy dañinas por sus fuertes impactos. La radiación β es más penetrante. La radiación γ 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 *becquerel* (Bq) que equivale a 1 desintegración por segundo. Otra unidad habitual es el *curie* (Ci) que equivale a $3,7 \cdot 10^{10}$ desintegraciones por segundo. El *contador Geiger* (fig. 2.4) permite medir la *actividad* de una muestra radiactiva.

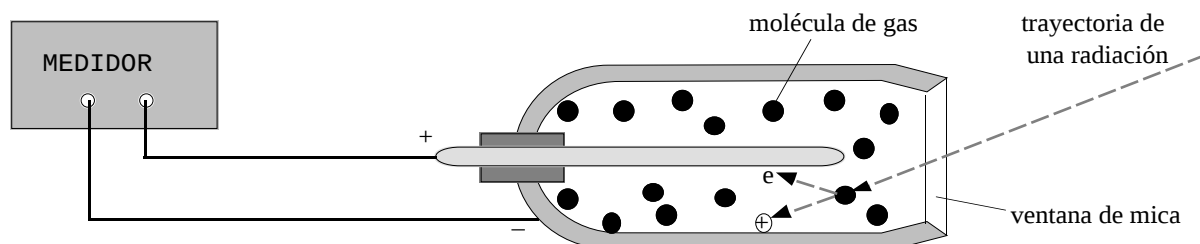


Figura 2.4. Contador Geiger. El alambre central tiene carga positiva y la capa del tubo tiene carga negativa. Cuando la radiación penetra a través de la ventana, ioniza uno o más átomos gaseosos. Los electrones son atraídos al alambre central y los iones positivos hacia la capa. Esto da lugar a una pulsación 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 radiación β y γ . Las partículas α 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 $10^{-2} \text{ J kg}^{-1}$.

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 β y γ , con lo que $Q = 20$, para la α .

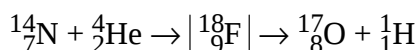
El *equivalente dosis* es el producto de la dosis por Q . La unidad del SI es el *sievert* (Sv) que

equivale a 1 J kg^{-1} . Otra unidad es el *rem* que equivale a $10^{-2} \text{ J kg}^{-1}$.

<i>Tabla 2.2. Efecto biológico de la radiación</i>	<i>Rem</i>	<i>Efecto</i>
	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

2.4 Nucleosíntesis

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



Una reacción de bombardeo suele abreviarse ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, p){}^{17}_8\text{O}$, en donde se escriben, de izquierda a derecha, 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. Sobre todo 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*).

2.5 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 $Z \geq 80$ tienen algún isótopo fisiónable siempre que se bombardee a alta energía.
- Los núcleos de $Z = 89$ a 98 se fisianan espontáneamente con vidas medias de 10^4 a 10^7 años.
- Los núcleos de $Z \leq 98$ se fisianan espontáneamente con vidas medias de milisegundos a días.

2.6 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 reacciones controladas de fusión para obtener energía, lo que constituye un reto tecnológico y científico de primer orden.

2.7 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

- 2.1 ¿En qué se diferencian las reacciones nucleares de las reacciones químicas ordinarias?
- 2.2 Define: energía de enlace, energía de enlace por nucleón, radiactividad, transmutación nuclear, serie

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

- 2.3 ¿Por qué es el hierro tan abundante en el universo?
- 2.4 En una de las series naturales de desintegración radiactiva, el uranio-235 ($^{235}_{92}\text{U}$) se desintegra con emisión de partículas α y β para formar finalmente plomo-207 ($^{207}_{82}\text{Pb}$). ¿Cuántas partículas α y β se emiten por átomo de plomo-207 formado?
- 2.5 ¿Cuáles de las siguientes transmutaciones no suponen emisión de partículas β ?
- a) $^{64}_{29}\text{Cu} \rightarrow ^{64}_{28}\text{Ni}$; b) $^{124}_{51}\text{Sb} \rightarrow ^{124}_{52}\text{Te}$; c) $^{212}_{83}\text{Bi} \rightarrow ^{212}_{84}\text{Po}$; d) $^{234}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{234}_{91}\text{Pa}$; e) $^{114}_{49}\text{In} \rightarrow ^{114}_{50}\text{Sn}$.
- 2.6 Sugiere el tipo de desintegración que sufrirán los siguientes núcleos:
- a) 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.
- 2.7 ¿Por qué tardan el mismo tiempo en desintegrarse 10 g de una sustancia hasta 5 g, que 1 g hasta 0,5 g?
- 2.8 ¿Cuál de las reacciones nucleares inducidas que se proponen *no* da el producto mencionado?:
- a) $^{10}_5\text{B}(\alpha, n)^{13}_7\text{N}$; b) $^{14}_7\text{N}(n, p)^{14}_6\text{C}$; c) $^{28}_{14}\text{Si}(\alpha, n)^{29}_{15}\text{P}$; d) $^{242}_{96}\text{Cm}(\alpha, 2n)^{243}_{97}\text{Bk}$.
- 2.9 Completa las siguientes ecuaciones nucleares y escríbelas en forma de “ecuación química”:
- a) $^{20}_{10}\text{Ne}(\alpha, ?)^{16}_8\text{O}$; b) $^{44}_{20}\text{Ca}(?, ^2_1\text{H})^{48}_{22}\text{Ti}$; c) $^{27}_{13}\text{Al}(^2_1\text{H}, ?)^{28}_{13}\text{Al}$.
- 2.10 Completa las siguientes reacciones nucleares y escríbelas en forma abreviada:
- a) $^{59}_{27}\text{Co} + \quad \rightarrow ^{56}_{25}\text{Mn} + ^4_2\text{He}$; b) $^2_1\text{H} + \quad \rightarrow ^4_2\text{He} + ^1_0\text{n}$; c) $^{124}_{51}\text{Sb} \rightarrow ^{124}_{52}\text{Te} + \quad$.
- 2.11 ¿En qué se diferencia la fisión de la radiactividad?
- 2.12 ¿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

- 2.1 Calcula la energía de enlace por nucleón del $^{55}_{25}\text{Mn}$. [$m(n) = 1,00867$ u, $m(p) = 1,00728$ u, $m(e) = 0,000549$ u, $m(^{55}\text{Mn}) = 54,9381$ u, $1 \text{ MeV} = 1,60 \cdot 10^{-13} \text{ J}$].
- 2.2 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 ($N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) y la velocidad de la luz ($c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$), calcula la energía media de enlace para los núcleos
- a) $^{24}_{12}\text{Mg}$ (masa isotópica del magnesio-24 = 23,9850 u).
- b) $^{41}_{19}\text{K}$ (masa isotópica del potasio-41 = 40,9618 u).
- c) $^{194}_{78}\text{Pt}$ (masa isotópica del platino-194 = 193,9627 u).
- 2.3 Sabiendo que $m(n) = 1,00867$ u, $m(p) = 1,00728$ u, $m(e) = 0,000549$ u, calcula:
- a) la masa isotópica del $^{51}_{23}\text{V}$ si su energía media de enlace es igual a $7,1408 \cdot 10^{-11} \text{ J}$.
- b) la masa isotópica de $^{94}_{40}\text{Zr}$ sabiendo que su energía media de enlace por nucleón es $1,3885 \cdot 10^{-12} \text{ J}$.

energía y masa en las reacciones nucleares

- 2.4 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) $^6_2\text{He} \rightarrow ^6_3\text{Li} + \beta^-$ $m(^6_2\text{He}) = 6,01888$ u; $m(^6_3\text{Li}) = 6,01512$ u
- b) $^8_2\text{He} \rightarrow ^7_3\text{Li} + \beta^- + ^1_0\text{n}$ $m(^8_2\text{He}) = 8,0375$ u; $m(^7_3\text{Li}) = 7,01600$ u
- 2.5 Calcula la masa isotópica del sodio-21 si en el proceso $^{21}\text{Na} \rightarrow ^{21}\text{Ne} + \beta^+$ se desprenden $5,67 \cdot 10^{-13}$ julios por partícula desintegrada [$m(^{21}\text{Ne}) = 20,99384$ u, $m(e) = 0,000549$ u, $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$].
- 2.6 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?

- 2.7 Un combustible que se ha propuesto para la fusión nuclear controlada es el deuteruro de litio, LiD (siendo $D = {}^2\text{H}$). ¿Cuál de las siguientes reacciones contribuiría posiblemente a la producción de energía?
 a) ${}^6\text{Li} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^3\text{H}$; b) ${}^6\text{Li} + {}^2\text{H} \rightarrow {}^24\text{He}$; c) ${}^2\text{H} \rightarrow {}^3\text{He} + {}^1_0\text{n}$
 $[m({}^1_0\text{n}) = 1,00867 \text{ u}, m({}^2\text{H}) = 2,01410 \text{ u}, m({}^3\text{H}) = 3,01605 \text{ u}, m({}^3\text{He}) = 3,01603 \text{ u}, m({}^4\text{He}) = 4,00260 \text{ u}, m({}^6\text{Li}) = 6,01513 \text{ u}]$.
- 2.8 En uno de sus modos de descomposición, el uranio-238 ($Z = 92$, $M_r = 238,0508$) emite una partícula α ($M_r = 4,00260$) con una energía cinética de 4,13 MeV ($1 \text{ MeV} = 1,60 \cdot 10^{-13} \text{ J}$), además de radiación γ para dar torio-234 ($Z = 90$, $M_r = 234,0436$). Calcula la longitud de onda de la radiación γ emitida [$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$, $c = 3,00 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$].

velocidad de desintegración, actividad radiactiva

- 2.9 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?
- 2.10 El tiempo de semidesintegración ($t_{1/2}$) del torio-234 es 24,1 d. Calcula su constante de desintegración (k).
- 2.11 El radón-222 tiene un periodo de desintegración de 3,82 d. Calcula el tiempo que tarda una muestra de 10,0 g de radón-222 en reducirse a 1,00 g.
- 2.12 El periodo de desintegración del ${}^{221}\text{Rn}$ es 25,0 min. ¿Qué cantidad de ${}^{221}\text{Rn}$ quedará sin desintegrar de una muestra de 100 mg al cabo de 2h?
- 2.13 Calcula el tiempo necesario para que una muestra de ${}^{246}\text{Cm}$ ($t_{1/2} = 5,5 \cdot 10^3$ años) reduzca su actividad radiactiva a la décima parte.
- 2.14 El 95,0% de una cierta cantidad de ${}^{106}\text{Rh}$ se desintegra en 562 min. Determina su periodo de desintegración.
- 2.15 De acuerdo a las regulaciones de la Comisión de Energía Atómica de los EEUU, la máxima dosis permisible de estroncio-90 ($t_{1/2} = 27,6 \text{ a}$) en el cuerpo de un adulto es de 1,00 microcuries ($1 \mu\text{C} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ C}$) aproximadamente. ¿A qué masa de estroncio-90 corresponde esta dosis máxima?
- 2.16 Un contador Geiger dado, hace un *bip* por cada 1000 partículas emitidas por una muestra. Calcula la actividad de la muestra (en curies)
 a) si hace 370 *bips* cada 10 segundos; b) si hace 1000 *bips* cada 100 segundos.
- 2.17 Una muestra de 1,0 kg absorbe 1,0 J de energía como resultado de una exposición a una radiación β . Calcula la dosis en rad y el equivalente de dosis en rem (Q para la radiación $\beta = 1$).
- 2.18 Estima la actividad de una fuente de 1,0 milicuries de radon-222 ($t_{1/2} = 3,82$ días) después de dos semanas.

datación

- 2.19 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.
- 2.20 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 $4,51 \cdot 10^9$ años, ¿cuánto tiempo ha transcurrido desde la formación geológica del mineral?.
- 2.21 En un mineral de uranio se determinó un contenido en ${}^{206}\text{Pb}$ de 0,252 gramos por cada gramo de ${}^{238}\text{U}$ presente. Calcula la edad del mineral de uranio si el periodo de desintegración del ${}^{238}\text{U}$ es $4,51 \cdot 10^9$ años.
- 2.22 La relación ${}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ en un carbón es el 25,4% de la que existe en la actualidad en el CO_2 atmosférico.

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

Soluciones a los seminarios

- 2.1 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.
- 2.2 Ver teoría.
- 2.3 Porque está situado en la zona de mayor estabilidad nuclear (ver figura 2.2).
- 2.4 Siete partículas α y cuatro partículas β .
- 2.5 La a).
- 2.6
- | <u>Isótopo</u> | <u>M_r^*</u> | <u>Inestable por</u> | <u>Radiactividad prevista</u> | <u>observada</u> | <u>$t_{1/2}$</u> |
|----------------|---------------------------|----------------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Berilio-10 | 9,01 | Exceso de n | β^- | β^- | $2,5 \cdot 10^6$ años |
| Nitrógeno-12 | 14,007 | Defecto de n | β^+ , Captura K | β^+ | 0,011 s |
| Cobre-68 | 63,5 | Exceso de n | β^- | β^-, γ | 30 s |
| Cobre-60 | 63,5 | Defecto de n | β^+ , Captura K | β^+ , Captura K, γ | 23 min |
| Bromo-87 | 79,9 | Exceso de n | β^- | β^-, n, γ | 55 s |
| Bromo-74 | 79,9 | Defecto de n | β^+ , Captura K | β^+ , Captura K, γ | 36 min |
| Cadmio-103 | 112,41 | Defecto de n | β^+ , Captura K | β^+ , Captura K | 10 min |
| Xenon-140 | 131,29 | Exceso de n | β^- | β^- | 16 s |
| Plutonio-232 | 244 | Defecto de n | β^+ , Captura K, α | Captura K, α | 36 min |
| Plutonio-246 | 244 | Exceso de n | β^-, α | β^- | 10,9 d |
| Americio-246 | 243 | Exceso de n | β^-, α | β^- | 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.
- 2.7 En ambos casos se tarda un tiempo igual al periodo de semidesintegración, que es constante.
- 2.8 En c) y la d), la suma de números atómicos y másicos no da el mismo resultado a la izquierda que a la derecha.
- 2.9 a) 2 partículas α ; b) núcleo de litio; c) un protón.
- 2.10 a) neutrón; b) núcleo de tritio; c) electrón.
- 2.11 Ver teoría.
- 2.12 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 $E = 7,727 \cdot 10^{-11} \text{ J} = 482,0 \text{ MeV}$;
 $E_{\text{media de enlace}}/A = 8,8 \text{ MeV por nucleón}$.
- 2.2 a) $1,33 \cdot 10^{-12} \text{ J por nucleón}$; b) $1,38 \cdot 10^{-12} \text{ J por nucleón}$;
 c) $1,27 \cdot 10^{-12} \text{ J por nucleón}$.
- 2.3 a) 50,945 u; b) 93,908 u.
- 2.4 a) $E = 5,62 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 3,50 \text{ MeV por átomo}$;
 $E = 3,38 \cdot 10^{11} \text{ J} = 9,39 \cdot 10^4 \text{ kW h por mol}$;
 b) $E = 1,92 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 12,0 \text{ MeV por átomo}$;
 $E = 1,15 \cdot 10^{12} \text{ J} = 3,21 \cdot 10^5 \text{ kW h por mol}$.
- 2.5 20,99873 u.
- 2.6 $E = 2,74 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 1,710 \text{ MeV por átomo}$;
 $E = 1,65 \cdot 10^{11} \text{ J por mol}$.
- 2.7 Todas las reacciones son exotérmicas. a) $E = 7,69 \cdot 10^{-13} \text{ J}$;
 b) $E = 3,59 \cdot 10^{-12} \text{ J}$; c) $E = 5,23 \cdot 10^{-13} \text{ J}$.
- 2.8 $\lambda = 7,45 \cdot 10^{-12} \text{ m}$.
- 2.9 $t_{1/2} = 27,6 \text{ a}$.
- 2.10 $k = 0,0288 \text{ d}^{-1}$.
- 2.11 $t = 12,7 \text{ d}$.
- 2.12 3,59 mg.
- 2.13 $1,83 \cdot 10^4$ años.
- 2.14 $t_{1/2} = 130 \text{ min}$.
- 2.15 $m = 6,94 \cdot 10^{-9} \text{ g}$.
- 2.16 a) $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ Ci}$; b) $2,7 \cdot 10^{-7} \text{ Ci}$.
- 2.17 $1,0 \cdot 10^2 \text{ rad}$, $1,0 \cdot 10^2 \text{ rem}$.
- 2.18 0,08 mCi.
- 2.19 3 000 años a.C.
- 2.20 $8,73 \cdot 10^8$ años.
- 2.21 $1,68 \cdot 10^9$ años.
- 2.22 11300 ± 100 años.