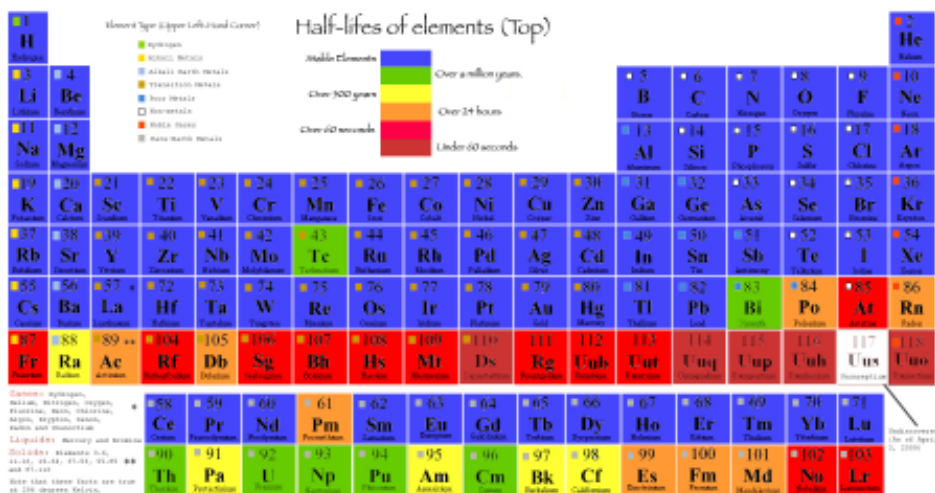


# 2

# NÚCLEO ATÓMICO Y RADIOACTIVIDAD



## IDEAS PRINCIPALES

Números atómico y másico

Isótopo

Defecto de masa y energía de enlace nuclear

Energía de enlace por nucleón.

Estabilidad nuclear

Radiaciones  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$

Series radiactivas y leyes de Soddy

Actividad, constante radiactiva y período de semidesintegración

Vida media

La radiactividad es un fenómeno en el que unos núcleos se transforman en otros al emitir algunas partículas. El proceso es exoenergético y, junto a peligros evidentes, también podemos utilizarla provechosamente. La radiactividad es un proceso espontáneo y estadístico, sin que sea posible saber cuando se desintegrará un átomo, siendo sólo posible obtener datos que se refieran a una gran cantidad de átomos.

El conocimiento de la estructura de la materia ha tenido durante el siglo XX un desarrollo impresionante, profundizando en la teoría atómica hasta alcanzar el nivel de los núcleos atómicos. Al conocimiento científico se ha unido casi de inmediato la aplicación técnica, tanto para usos militares como industriales, lo que ha llevado a la ciencia a ocupar un papel protagonista en las sociedades desarrolladas. Sin embargo, no todo son aspectos positivos y el desarrollo ha venido acompañado de negros nubarrones: bombas atómicas, residuos radiactivos, etc., que exigen un gran debate y toma de postura por parte de todos los ciudadanos sobre estos temas.

## 1 BREVE INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

La idea de que la materia está compuesta en último término por partículas, es muy antigua, ya que procede de los principios de la época griega. Estas partículas, a las que se dio el nombre de átomos, no fueron definidas con precisión hasta después del estudio cuantitativo de la materia realizado en el s. XIX. La idea de que los átomos no eran las partículas últimas tuvo que esperar hasta el final de dicho siglo, y no se llegó al concepto de núcleo como pequeño centro del átomo hasta la segunda década del s. XX.

A finales del s. XIX la hipótesis atómica era aceptada por la mayoría de los científicos aunque aún algunos se mostraban reticentes. En las últimas décadas del siglo empezó a abriose paso la idea de que los átomos eran divisibles y que algunas partículas, como los electrones, se encontraban en todos los átomos.

Ya hemos mencionado en el capítulo anterior que en el siglo XIX se llevaron a cabo numerosas experiencias de descargas eléctricas en el interior de tubos llenos de diferentes gases. Cuando la presión en el interior del tubo era muy baja (0,000001 atm) se obtenía una radiación que se llamó rayos catódicos. Después de que se llevaran a cabo bastantes experiencias, se llegó a la conclusión de que esa radiación estaba constituida por partículas negativas. Thomson midió en 1897 el cociente ( $e/m$ ) entre la carga y la masa de dichos corpúsculos y llegó a la conclusión de que no dependían ni del material del que estuviese hecho el cátodo ni del gas que hubiera en el tubo. Hoy sabemos que los rayos catódicos no son otra cosa que electrones, y en su momento tuvieron una gran importancia en que avanzara la idea de que existían partículas más pequeñas que los átomos, que eran constituyentes de los mismos.

Los rayos X fueron observados por Röntgen en 1895. Estaba estudiando los rayos catódicos cuando observó que, aunque el tubo estuviese completamente cubierto por un papel negro, del mismo salía una radiación capaz de impresionar una placa fotográfica. El nombre de rayos X procede precisamente del desconocimiento sobre dicha radiación. Los rayos X tuvieron una rápida aceptación por lo espectacular de sus «fotografías», que permitían ver los huesos a través de la piel.

Muchos científicos se pusieron a trabajar sobre aspectos relacionados con los rayos X. Henri Becquerel, intentó comprobar si los cuerpos fluorescentes eran capaces de producir rayos X. Después de probar con una serie de sustancias, lo hizo con sales de uranio cuya fluorescencia había estudiado antes\*. En sus trabajos, en 1897 Becquerel llegó a la conclusión de la existencia de una nueva radiación capaz de atravesar gruesos papeles y oscurecer placas fotográficas, y de ionizar los gases, haciéndolos conductores, propiedad muy importante porque permitía medir si la sustancia era más o menos activa.



Becquerel



Röntgen

\* Cuerpo fluorescente es aquel que emite luz cuando está siendo excitado por radiación luminosa. Se dice que es fosforescente cuando la emisión de luz continúa aún después de haber cesado la excitación luminosa.

El matrimonio Pierre y Marie Curie iniciaron su trabajo sobre los rayos uránicos a finales de 1897. Lo primero a lo que prestaron atención fue a la medida de la actividad de diferentes muestras aprovechando la propiedad de que esa radiación era capaz de ionizar el aire. Pierre Curie disponía de un aparato capaz de medir pequeñas cantidades de corriente, un electrómetro de cuarzo piezoeléctrico, que había desarrollado y perfeccionado unos años antes. Midiendo la ionización que provocaban distintas fuentes llegaron a la conclusión de que la radiactividad (nombre que propuso M. Curie) no dependía de cómo estuviese combinado el uranio, daba igual que fuese un óxido, o un cloruro o cualquier otra sal, sino de la proporción en la que estuviese. Esto llevaba a la idea de que la radiactividad no era un fenómeno químico, sino otro tipo de fenómeno que sólo parecía tener que ver con el propio átomo de uranio. Lo mismo descubrieron con respecto al torio.

Cuando examinaron la radiactividad de minerales de distintos yacimientos encontraron que en algún caso era mayor que la radiactividad del uranio o del torio puros. Como eso era imposible, supusieron que en esos minerales debían existir algunos elementos desconocidos hasta entonces que fuesen más activos que el uranio y el torio. Eso les llevó a la búsqueda de dichos elementos y después de muy penosos trabajos aislaron sales de polonio y de radio (1898).

A partir de estos momentos la radiactividad llamó la atención de muchos científicos. E. Rutherford (1899) llegó a la conclusión de que las radiaciones emitidas por el uranio eran de dos clases, y las clasificó por su poder de penetración; llamó rayos alfa ( $\alpha$ ) a los que tenían menor poder de penetración y rayos beta ( $\beta$ ) a las que tenían mayor poder de penetración. La radiación beta fue pronto identificada como electrones, mientras que la alfa fue más difícil de identificar y hasta 1908 no estuvieron seguros que las partículas alfa son iones  $\text{He}^{2+}$ . El descubrimiento de los rayos gamma ( $\gamma$ ) por P. Villard en 1906, completó el análisis de las radiaciones.

Casi desde el principio los científicos advirtieron que los procesos radiactivos iban acompañados de la liberación de importantes cantidades de energía.

La radiactividad jugó un papel muy importante en el estudio de la estructura del átomo dando lugar a un nuevo campo de investigación:

\* Puso de manifiesto la posibilidad de obtener un átomo a partir de otro diferente. En 1903 se observó que se producía helio a partir de radio; en 1910 quedó claro que el radón (Rn) también se obtenía a partir del radio. Por lo tanto los átomos no eran inmutables.

\* Posibilitó la utilización de «proyectiles» naturales para investigar la posible estructura compleja de los átomos. En el famoso experimento de Rutherford se utilizaron como proyectiles partículas alfa procedente de una fuente radiactiva.

\* Estimuló la construcción de sistemas de detección para analizar las partículas que se producían en los procesos: cámara de niebla, detector Geiger, etc.

**A.1.-** ¿En qué año se observaron por primera vez los fenómenos radiactivos? ¿Qué estudiaba Becquerel cuando observó que la placa había sido impresionada? ¿En qué se basaban los esposos Curie para medir la actividad de una muestra? ¿Cómo llegaron a la conclusión de que la radiactividad no era un fenómeno químico ordinario? ¿Cuál fue la primera diferencia reconocida entre las partículas  $\alpha$  y  $\beta$ ?

\* A veces se presenta el descubrimiento de la radiactividad como un descubrimiento fortuito. La primera conclusión a la que llegó Becquerel es que la fluorescencia iba acompañada de rayos X, ya que las sales de uranio fluorescentes expuestas a la luz solar emitían una radiación capaz de traspasar un papel grueso e impresionar una placa fotográfica. Las historias siempre cuentan que el hecho de que durante varios días estuviese nublado en París fue lo que permitió a Becquerel su descubrimiento, ya que tuvo que guardar las sales de uranio y las placas fotográficas hasta que hubiese sol. Es cierta la anécdota, pero también es cierto que Becquerel, en lugar de seguir trabajando sin tener en cuenta ese hecho, antes de continuar su investigación reveló la placa fotográfica que había estado guardada en el cajón, y que al observar que había quedado impresionada incluso en la oscuridad concluyó que no podía ser debido a la fluorescencia y que sería debido a un fenómeno nuevo.



Marie y Pierre Curie

El modelo nuclear\* aceptado actualmente, formado por protones y neutrones, fue propuesto por W. Heisenberg en 1.932. La representación  ${}^A_ZX$  contiene toda la información necesaria para conocer el número de electrones de la corteza electrónica y el número de protones y neutrones del núcleo.

**Z = número atómico:** es el número de protones que tiene el núcleo.

**A = número másico:** es la suma del número de protones y de neutrones.

**N = A-Z** es el número de neutrones que tiene el núcleo.

De la misma forma que decimos que átomos de la misma clase son átomos del mismo elemento, cuando nos referimos a los núcleos de un mismo tipo (igual número de protones y neutrones) diremos que son del mismo nucleido.

La masa de los núcleos se expresa en **unidades de masa atómica u**. Su equivalencia con la unidad del SI es  $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .

El tamaño del núcleo puede medirse mediante su radio, ya que los núcleos en su estado fundamental se suponen esféricos; las dimensiones del núcleo dependen del número másico, A, según la ecuación:

$$r = r_0 \sqrt[3]{A} \quad r_0 = 1,1 \cdot 10^{-15} \text{ m}$$

Puesto que los números másicos sólo llegan a 250, el tamaño de los mayores núcleos es siempre muy pequeño comparado con el tamaño de los átomos, que es del orden del angström (Å), siendo  $1 \text{ Å} = 10^{-10} \text{ m}$ .

En tan reducidas dimensiones se concentra prácticamente toda la masa del átomo. Las densidades de los núcleos son muy elevadas, del orden de  $3 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3$ .

**A.2.- a)** Calcula la densidad media de un átomo de hierro si su masa es 56 u y su radio 1,24 Å. ¿Hay mucha diferencia entre la densidad del átomo de hierro y la densidad de la sustancia hierro en estado sólido que es de 7873 kg/m<sup>3</sup>? ¿Por qué?

**b)** ¿Qué es más denso, el núcleo de un átomo o la materia ordinaria? ¿Por qué hay tanta diferencia entre la densidad de un átomo y la densidad de un núcleo?

$$\text{densidad átomo hierro} = 11220 \text{ kg/m}^3$$

Además de tamaño, masa y carga eléctrica, el núcleo posee otras propiedades: momento angular (que origina un momento magnético nuclear), momento eléctrico (debido a la distribución no simétrica de su carga), etc., que juegan un papel importante en cualquier teoría o modelo que se propone sobre la constitución del núcleo.

### ¡No fue tan fácil!

El modelo de átomo propuesto por J.J. Thomson en 1907, no contemplaba la existencia de núcleo como parte diferenciada. Se concebía el átomo como una esfera positiva con incrustaciones negativas, los electrones. Los datos de H. Geiger y E. Marsden (1909) sobre cómo se desvían las partículas alfa al atravesar una fina lámina de oro, no concordaban con este modelo. Fue en 1911 cuando Rutherford propuso su modelo de átomo con una carga central, que ocupaba un volumen muy pequeño en relación con el átomo entero, a la que siguió su demostración de que este núcleo daba cuenta de la mayor parte de la masa atómica. El núcleo estaría formado por protones y neutrones!, lo que estaba de acuerdo con los fenómenos radiactivos.

#### ALGUNAS UNIDADES DE USO EN FÍSICA NUCLEAR

##### LONGITUD

fentómetro (fm) o Fermi =  $10^{-15} \text{ m}$ ;  
angström (Å) =  $10^{-10} \text{ m}$

##### SUPERFICIE

barn (b) =  $10^{-28} \text{ m}^2$

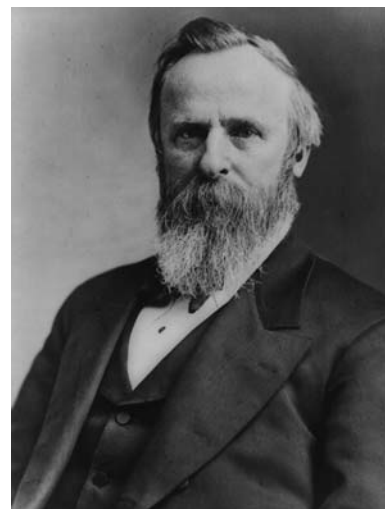
##### ENERGÍA

eV =  $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

MeV =  $10^6 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$

GeV =  $10^9 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-10} \text{ J}$

La masa de 1 u equivale, en el sentido de Einstein, a 931,5 MeV



Rutherford



Este modelo nuclear planteaba dificultades como era explicar la existencia de isótopos de forma que hacia 1920, Rutherford ya intuía la necesidad de una partícula que tuviese la misma masa del protón pero que no tuviese carga. Sin embargo, hasta 1930 no se observó una radiación que tuviese esas características. Fue J. Chadwick en 1932, el primero en identificar esa radiación como el neutrón.

**A.3.-** ¿Qué cambio supuso el modelo de Rutherford respecto al de Thomson? ¿Y el de Heisenberg respecto al de Rutherford?

## 2.1 Isótopos

Decimos que dos núcleos son isótopos cuando tienen el mismo número de protones y distinto número de neutrones. Los isótopos tienen prácticamente las mismas propiedades químicas y sólo difieren algo en sus propiedades físicas. Durante todo el siglo XIX no se tuvo en cuenta la posibilidad de la existencia de isótopos, y de hecho esa existencia contradice una de las hipótesis de la teoría atómica de Dalton, que suponía que todos los átomos de un mismo elemento tenían la misma masa.

El nombre de isótopo lo propuso Soddy en 1911. Puesto que en ese momento aún no se tenía clara la constitución del átomo, se definían los isótopos diciendo que eran átomos de un mismo elemento que tenían distinta masa atómica. Midiendo la masa atómica del plomo en diversas muestras radiactivas, se observó que oscilaba entre 206,4 y 208,4, mientras que cuando la muestra procedía de yacimientos no radiactivos, el valor de la masa atómica era constante e igual a 207,2.

La mayoría de los elementos que nos encontramos en la naturaleza tiene varios isótopos aunque de algunos como el fluor, el sodio, el fósforo se encuentre un sólo núclido. En los laboratorios nucleares se producen isótopos de todos los elementos, ampliándose mucho el número de isótopos. En la tabla adjunta se reflejan algunos ejemplos de isótopos naturales. Para nombrar un isótopo particular de un elemento se indica el símbolo y el número másico; así, cuando escribimos Cl-35, nos referimos al isótopo del cloro cuyo número másico es 35. Normalmente no tienen «nombre propio», excepto en los isótopos del hidrógeno que se llaman protio (el que tiene sólo un protón), deuterio (el que tiene protón y neutrón) y tritio (el que tiene un protón y dos neutrones).

Elemento	Isótopo	%
Hidrógeno	H-1	99,985
	H-2	0,015
Carbono	C-12	98,892
	C-13	1,018
Sodio	Na-23	100
Cloro	Cl-35	75,79
	Cl-37	24,20
Bario	Ba-130	0,101
	Ba-132	0,097
	Ba-134	2,42
	Ba-135	6,59
	Ba-136	7,81
Uranio	Ba-137	1,32
	Ba-138	71,66
	U-234	0,0057
	U-235	0,7196
	U-238	99,276

## 2.2 Interacción fuerte

**¿Cómo explicar la gran estabilidad de los núcleos con las fuertes repulsiones que se producen entre los protones?**

Las fuerzas electromagnéticas capaces de explicar la atracción entre protones y electrones de un mismo átomo y los distintos tipos de uniones entre átomos (teoría del enlace químico) no pueden explicar la gran estabilidad de los núcleos, ya que serían de repulsión. Las fuerzas gravitatorias son muy pequeñas comparadas con las electromagnéticas por lo que tampoco pueden explicar la estabilidad de los núcleos. Hay que suponer que las partículas nucleares fundamentales, protones y neutrones, se encuentran unidas entre sí por fuerzas diferentes a las electromagnéticas y gravitatorias estudiadas hasta ahora, de una intensidad extraordinaria y que reciben el nombre de «interacciones fuertes». Estas fuerzas nucleares se caracterizan por su **corto radio de acción**, pues sólo se manifiestan en el interior de los núcleos, presentan **un carácter saturado**, es decir, sólo se ejercen entre nucleones en contacto (los únicos a distancia suficientemente pequeña para que tenga lugar la interacción) y son **independientes de la carga eléctrica**, presentándose igualmente entre un protón y un neutrón ( $p \leftrightarrow n$ ), entre dos neutrones ( $n \leftrightarrow n$ ) o entre dos protones ( $p \leftrightarrow p$ ).

# 3

## ENERGÍA DE ENLACE Y ESTABILIDAD NUCLEAR

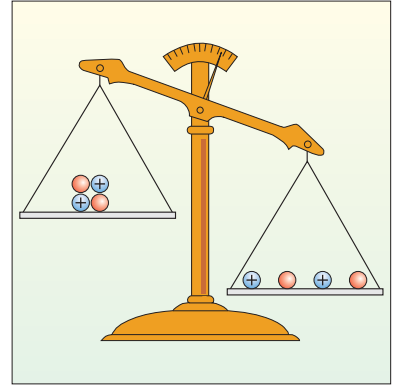
Si un núcleo atómico es más estable que los nucleones que componen ese núcleo separados, supone que la energía del núcleo formado es menor que la energía de los neutrones y protones cuando están separados. Por lo tanto, en la formación de un núcleo a partir de protones y neutrones (nucleones) tiene lugar una liberación de energía. Teniendo en cuenta que una disminución de energía debe ser simultánea a una disminución de masa, el hecho de que haya una liberación de energía debe traducirse en una apreciable diferencia entre la masa de los nucleones constituyentes y la masa del núcleo resultante; a esta diferencia se le llama «**defecto de masa**», que viene dada por<sup>1</sup> :

$$\Delta m = Z m_p + N m_n - M$$

$M$  = masa del núcleo;  $m_n$  = masa del neutrón;  $m_p$  = masa del protón

Teniendo en cuenta la equivalencia entre masa y energía establecida en la teoría de la relatividad, transformamos el defecto de masa en la equivalente **energía de enlace nuclear** ( $B$ ), que es la cantidad de energía liberada al formarse el núcleo por unión de sus nucleones constituyentes. Ya que debe cumplirse el principio de conservación de la energía, la energía de enlace nuclear coincide con la cantidad de energía necesaria para desintegrar el núcleo en sus nucleones constituyentes, o lo que es igual:

$$B = \Delta E = \Delta m c^2 = (Z m_p + N m_n - M) c^2$$



<sup>1</sup> En este caso definimos:

$\Delta m$  = masa inicial – masa final  
en lugar de:

$\Delta m$  = masa final – masa inicial  
con objeto de que  $\Delta m$  sea un valor positivo.

**A.4.-** Calcula el defecto de masa en la formación del átomo de deuterio, sabiendo que el deuterio es un isótopo del hidrógeno cuyo núcleo está formado por un protón y un neutrón. Calcula también la energía de enlace nuclear liberada en su formación. (Utiliza la masa del protón con electrón ligado).

$$\Delta m = 0,00239 \text{ u}; \Delta E = 3,57 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 2,23 \text{ MeV}$$

**A.5.-** a) Calcula la cantidad de energía que, como mínimo, debe poseer una radiación gamma para poder desintegrar un átomo de deuterio.

b) Calcula la energía liberada en la fusión de cuatro átomos de hidrógeno que dan lugar a un átomo de helio.

$$\text{a) } E > 2,23 \text{ MeV} \quad \text{b) } \Delta E = 26,7 \text{ MeV}$$

### ¿Cuál es el origen de la energía nuclear?, ¿qué pasa con ella al formarse un núcleo?

Para entenderlo haremos una analogía con algo que ya conoces. Considera un sistema formado por la Tierra y un helicóptero en reposo a 100 m de altura.

- El sistema Tierra-helicóptero tiene energía potencial gravitatoria. Esa energía potencial se debe a la existencia de la fuerza gravitatoria.

Ahora cae el helicóptero y choca con la Tierra, quedando en reposo.

- La energía potencial gravitatoria disminuye y aumenta la cinética. Al final, esa energía se transfiere al suelo y al propio helicóptero haciendo que aumente un poco su temperatura. Por lo tanto el sistema ha disminuido su energía que ha sido transferida al exterior.

Ahora consideremos el sistema formado por varios nucleones separados.

- Ese sistema tiene *energía potencial nuclear*, cuyo origen está en la existencia de una fuerza de tipo nuclear, denominada interacción fuerte.

Consideremos que los nucleones se unen formando el núcleo.

Disminuye la energía potencial nuclear y se transforma en otro tipo de energía que el núcleo ya formado cede al exterior. La energía ni aparece ni se pierde. La energía que cede el núcleo al exterior es la misma energía potencial que tenían los nucleones por separado. Igual que la energía que se cede cuando el helicóptero cae es la energía potencial gravitatoria.

Si queremos subir el helicóptero a la posición inicial hay que darle la misma cantidad de energía que antes cedió. Si queremos separar los nucleones de un núcleo hay que darle la misma cantidad de energía que éste cede al formarse.

- A.6.-** a) Calcula la energía de enlace ( $B$ ) de los siguientes isótopos. helio-4, oxígeno-16, cloro-35, hierro-56, estroncio-90, rutenio-100, plata-108, bario-138, bismuto-210 y uranio-238.
- b) Calcula la energía de enlace por nucleón ( $B/A$ ) de cada uno.
- c) A partir de los datos que has calculado, analiza como cambia la energía de enlace  $B$  y la energía de enlace por nucleón ( $B/A$ ) en función del número másico.

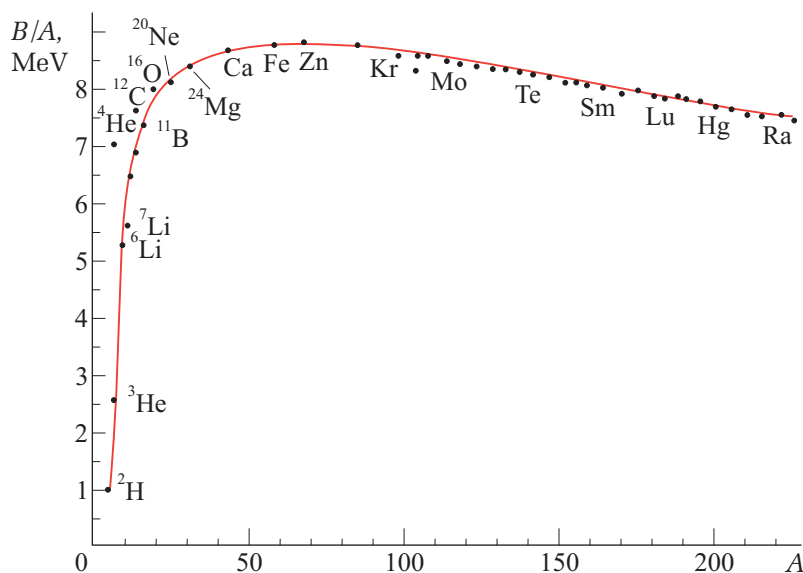
\* Conviene resaltar la gran diferencia energética que existe entre los procesos químicos y los nucleares. Así, mientras en un átomo la energía de enlace de los electrones y el núcleo es del orden del electronvoltio (eV), la energía de enlace por nucleón en un núcleo es del orden de los MeV. Según esto los átomos se pueden excitar con cierta facilidad y pueden unirse para formar moléculas, mientras que para excitar un núcleo son necesarias condiciones muy especiales (aceleradores de partículas) debido a su elevada energía de enlace.

### Gráfica $B/A-A$

La energía de enlace por cada nucleón ( $B/A$ ) crece con el número másico ( $A$ ) hasta alcanzar un valor máximo para los nucleidos de número másico mediano (el Fe-56 es uno de los más estables) y decrece progresivamente para aquellos que tienen un elevado número másico. De la gráfica se deduce que resulta más estable un sistema formado por dos núcleos de número másico intermedio que un núcleo formado por la suma de ambos; así pues si un núcleo pesado, como el uranio, se divide en dos más ligeros (fisión) se desprenderá energía en el proceso. Por otro lado, resulta más estable un núcleo de número másico intermedio que dos núcleos de número másico pequeño, por lo que en un proceso en el que se unan dos núcleos ligeros para formar un núcleo intermedio (fusión) se producirá también una liberación energía.

### Resultados de la A.6

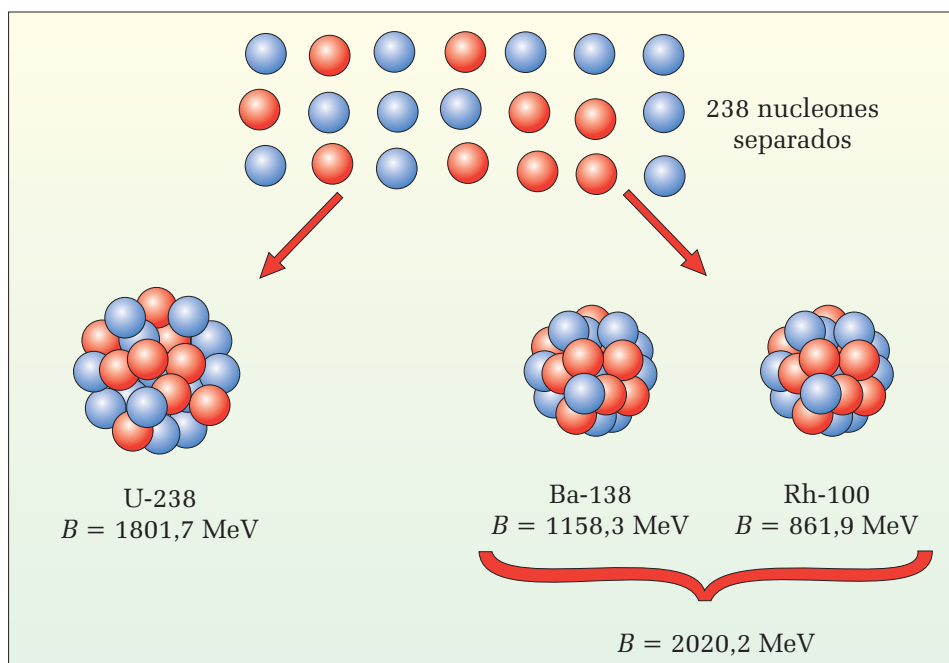
Núcleo	$B$ (MeV)	$B/A$
He-4	28,3	7,07
O-16	127,6	7,98
Cl-35	298,2	8,52
Fe-56	492,3	8,79
Sr-90	784,1	8,71
Ru-100	861,9	8,62
Ag-108	922,5	8,54
Ba-138	1158,3	8,39
Bi-210	1644,8	7,83
U-238	1801,7	7,57



## La estabilidad de los núcleos

La estabilidad de los distintos núcleos se puede comparar teniendo en cuenta la energía de enlace de cada uno de ellos. Esta energía será tanto más alta cuanto mayor sea el número de nucleones, tal como hemos comprobado en la actividad anterior. Pero eso no es una buena medida ya que el mayor valor se debe a que hay más nucleones participando en el proceso. Para poder comparar la estabilidad de los distintos núcleos es necesario conocer los valores de la energía de enlace por cada nucleón,  $B/A$ , que compone el núcleo. Un núcleo será más estable que otro si «su energía de enlace por nucleón» es mayor.

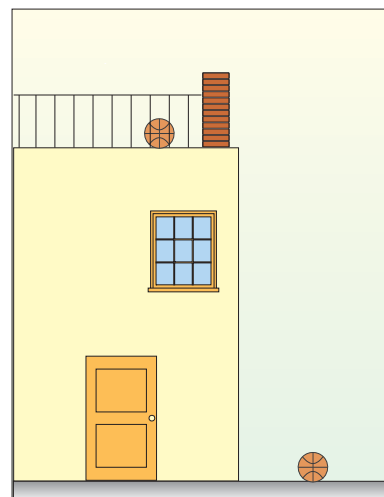
Ejemplo: supongamos 238 nucleones separados (92 p + 146 n). Esos nucleones se pueden agrupar de diferentes maneras, de las que compararemos las dos representadas en el dibujo. Si forman un núcleo de uranio-238, la energía de ligadura es de 1801,7 MeV. Si forman dos núcleos más pequeños, la energía de ligadura total supone 2020,2 MeV, mayor que la que se desprende si se forma uranio sólo. Por lo tanto, esta segunda situación es más estable que la primera. La situación más estable coincide con aquella en la que la energía de enlace por nucleón es mayor.



## Barrera de potencial

Hemos visto que los núcleos más estables son los que tienen número másico intermedio. De acuerdo con eso, ¿por qué no se rompen espontáneamente todos los núcleos de mayor número másico en otros más pequeños? ¿por qué no se unen los núcleos de pequeño número másico en otros más grandes?

Hay que tener en cuenta que para eso ocurra hay que superar la barrera de potencial de esos núcleos. Algo parecido ocurre en las reacciones químicas: todos conocemos que el butano reacciona con el oxígeno, en un proceso exoenergético en el que los productos son más estables que los reactivos. Sin embargo eso no ocurre espontáneamente, sino que hay que excitar las moléculas de butano y oxígeno para que comience la reacción. Hay que suministrar una energía que es igual a la barrera de potencial\*.



\* Un ejemplo aún más elemental. Si tenemos una pelota en una terraza tiene más energía que si está en el suelo de la calle. ¿Por qué no cae? Porque necesita una cantidad de energía para superar el pretil de la terraza. Esa cantidad de energía es la barrera de potencial.



## EJEMPLO

a) Calcula la energía de enlace de los núcleos  ${}^3_1\text{H}$  y  ${}^3_2\text{He}$

b) ¿Qué conclusión, acerca de la estabilidad de dichos núcleos, deducirías de los resultados del apartado a)?

$m(\text{He-3}) = 3,016029 \text{ u}$ ;  $m(\text{tritio}) = 3,016049 \text{ u}$ ;  $m_p = 1,007825 \text{ u}$ ;  $m_n = 1,008665 \text{ u}$ ;  $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

a) El núcleo  ${}^3_1\text{H}$  está formado por un protón y dos neutrones. El defecto de masa será igual a la suma de las masas de esas partículas menos la masa del tritio. Es decir:

$$\Delta m = (m_p + 2 m_n) - m_{\text{tritio}} = (1,007825 + 2,017330) - 3,016049 = 0,0091 \text{ u}$$

La energía de enlace nuclear será:

$$\Delta E = \Delta m c^2 = 0,0091 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 1,36 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

Esa energía equivale a 8,91 MeV

El núcleo  ${}^3_2\text{He}$  está formado por dos protones y un neutrón. Para calcular el defecto de masa se procede de forma análoga:

$$\Delta m = (2 m_p + m_n) - m_{\text{helio}} = (2,015650 + 1,008665) - 3,016029 = 0,0083 \text{ u}$$

La energía de enlace nuclear será:

$$\Delta E = \Delta m c^2 = 0,0083 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot 9 \cdot 10^{16} = 1,24 \cdot 10^{-12} \text{ J que equivale a 7,75 MeV}$$

b) Respecto a la estabilidad de los núcleos será más estable aquel cuya energía de enlace por nucleón sea mayor. Puesto que el número de nucleones es el mismo en ambos núcleos, será más estable el de tritio ya que la energía de enlace nuclear es mayor.

**A.7.-** La masa del isótopo oxígeno-16 es 15,99492 u y la masa del oxígeno-17 es 16,99913 u. ¿Cuál es más estable? Explica por qué.

Es más estable el oxígeno-16

**A.8.-** A la vista de la gráfica  $(B/A)-A$ , indica:

- El intervalo de los números mágicos de los elementos más estables.
- Los intervalos de los números mágicos de los elementos más inestables.
- ¿Por qué los átomos de masa atómica elevada, no se fragmentan espontáneamente en dos átomos más pequeños, que serían más estables, en un proceso exoenergético?

**A.9.-** Hemos visto que un núcleo tiene menos masa y menos energía que los nucleones separados. ¿Se cumple el principio de conservación de la masa cuando se forma un núcleo? ¿Se cumple el principio de conservación de la energía cuando se forma un núcleo? Explica las respuestas.

# 4

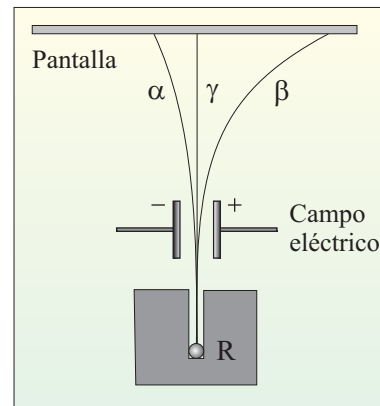
## RADIATIVIDAD NATURAL

La radiactividad consiste en la emisión, por parte del núcleo de los átomos, de diferentes tipos de partículas y radiaciones, cambiando en muchos casos el número atómico del núcleo emisor y transformándose por lo tanto en un átomo de un elemento diferente. Las radiaciones emitidas tienen un contenido energético elevado. La energía que tienen las radiaciones emitidas es igual a la diferencia de energía del núcleo radiactivo original y la energía del núcleo residual, es decir, del núcleo que queda después de emitir la radiación.

En la introducción ya se hizo alusión a los principales científicos que estudiaron este fenómeno. En este apartado profundizaremos sobre las características de las partículas emitidas y sobre los aspectos cuantitativos relacionados con la cantidad de radiación emitida.

## 4.1 Naturaleza de las radiaciones

Las emisiones radiactivas se llamaron radiaciones alfa, beta y gamma y más tarde partículas  $\alpha$  y  $\beta$  y radiación  $\gamma$ . La primera propiedad que se estudió fue su capacidad de penetración y después su capacidad de ionizar el aire (capacidad de arrancarle electrones a las moléculas del aire para hacerlo conductor). Para analizar su carga eléctrica se analizó cómo se desviaban cuando se movían en el interior de un campo eléctrico o un campo magnético. Estas propiedades podemos resumirla en la tabla siguiente:



emisión	carga (e)	$m_0$ (u)	naturaleza	características
$\alpha$	+2	4	núcleo de helio	velocidad entre $1,5$ y $2 \cdot 10^7$ m/s. Alta capacidad de ionización; baja capacidad de penetración
$\beta$	-1	0,00054	electrón	velocidad alta, de $0,3$ a $0,9$ c; poca capacidad de ionización; gran capacidad de penetración
$\gamma$	0	0	onda electromagnética de $\lambda$ corta	$v = c$ ; poder de penetración mayor que el de los rayos X, atraviesan láminas de hierro de hasta 25 cm

### Características de la emisión alfa

La emisión de una partícula alfa nos plantea algunas preguntas:

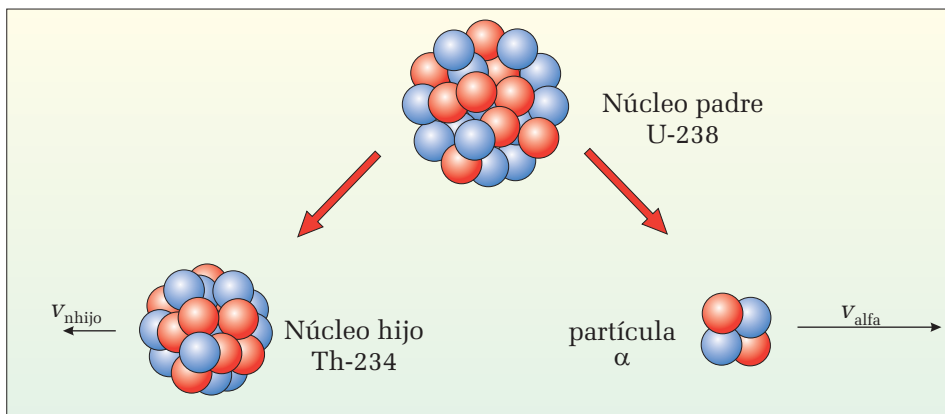
a) ¿Existen las partículas alfa en el interior de los núcleos antes de ser emitidas?

Las experiencias realizadas indican que no, se forman en el proceso de emisión.

b) ¿De dónde procede la energía cinética que tiene la partícula alfa, así como la que tiene el núcleo emisor, que retrocede a causa de la emisión? Esa energía procede de la diferencia de masa entre el núcleo padre y la suma de la masa del núcleo hijo y la partícula alfa.

c) ¿Por qué la partícula alfa adquiere más energía cinética que el núcleo hijo? En el proceso de emisión debe conservarse la energía y debe conservarse la cantidad de movimiento. Si suponemos que el núcleo padre estaba en reposo, se debe cumplir:

$$0 = m_{\text{nhijo}} v_{\text{nhijo}} + m_{\text{alfa}} v_{\text{alfa}}; \quad v_{\text{nhijo}} = - m_{\text{alfa}} v_{\text{alfa}} / m_{\text{nhijo}}$$



Puesto que la masa de la partícula alfa es mucho menor que la del núcleo hijo, la velocidad de ese núcleo será mucho menor que la de la partícula alfa. Si además tenemos en cuenta que la energía cinética depende del cuadrado de la velocidad, eso explica que la mayor parte de la energía la tome la partícula alfa.

d) ¿Por qué se emite una partícula alfa y no un protón o un neutrón que es lo que realmente hay en los núcleos? La explicación está en el balance energético. Si se hacen los cálculos se comprueba que la energía potencial del sistema final es mayor que la del sistema inicial, por lo que el proceso no ocurre de forma espontánea. Así, la emisión de un protón por parte de un núcleo de uranio supondría que el sistema final tendría más energía potencial que el sistema inicial. Así, para que ocurriera ese proceso, tendríamos que suministrar energía en lugar de que el sistema cediese energía.

e) Por último cabe preguntarse, ¿cómo es posible que una partícula alfa pueda salir del núcleo si la energía que tienen es menor que la barrera de potencial que han de superar? Según la mecánica clásica esto no tiene explicación; sólo en el marco de la mecánica cuántica podemos encontrar una explicación teórica, mediante un procedimiento conocido como “efecto túnel”. Se ha encontrado incluso una relación entre la rapidez de la desintegración y la “falta de energía” necesaria para que salga la partícula. Mientras más energía falte más lenta es la desintegración de un determinado tipo de núcleo.

**A.10.-** a) El U-238 emite una partícula alfa y se convierte en Th-234. Calcula si ese proceso desprende o se absorbe energía. Exprésala en MeV.

b) Si el U-238 emitiera un protón se convertiría en Pa-237. Calcula si ese proceso desprende o absorbe energía. Exprésala en MeV.

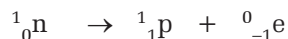
c) Si el Pb-206 emitiera una partícula alfa se convertiría en el Hg-202. Calcula si es un proceso que desprende o absorbe energía. Exprésalo en MeV. ¿Qué explicación puede tener que el Pb-206 sea un isótopo estable?

a) desprende 4,27 MeV; b) absorbe 7,67 MeV c) emite 1,15 MeV

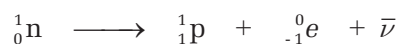
## Características de la desintegración beta

La emisión de electrones desde el núcleo parece posible cuando se acepta un modelo atómico como el primero de Rutherford en el que en el núcleo había protones y electrones, pero en el modelo actual, en el que en el núcleo sólo hay protones y neutrones hay que buscar otra explicación.

En 1934 Fermi propuso la siguiente teoría de la desintegración beta: un neutrón del núcleo se transforma en un protón, que se queda en el núcleo, y un electrón que es inmediatamente emitido.

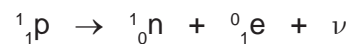


Realizados los cálculos de energía y de momento lineal se observó que «faltaba» energía y que “faltaba” momento lineal. Parecía pues que no se cumplían esas leyes de conservación en el mundo subatómico. Sin embargo, la confianza en dichos principios de conservación hizo que Pauli propusiese la emisión de otra partícula, a la que Fermi (1934) llamó neutrino. (En realidad lo que se emite es un antineutrino). El proceso\* podríamos representarlo así:

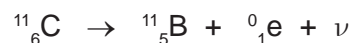


El neutrino es una partícula sin carga, cuya masa debe ser muy pequeña (mucho menor que la del electrón) y que interacciona muy poco con la materia. Hasta el año 1953 no se tuvo evidencia experimental de su existencia.

\*Existe otro proceso conocido como desintegración b(+). Consiste en la emisión por parte del núcleo de un positrón. El positrón es lo que se llama un (antielectrón), es decir, una partícula que tiene la misma masa que el electrón pero carga eléctrica positiva. En este caso se supone que lo que se transforma es un protón, dando lugar a un neutrón, un positrón y un neutrino. El proceso puede esquematizarse con la ecuación:



La existencia del positrón la había propuesto Dirac en 1931 y se tuvo evidencia experimental en el mismo año. Un ejemplo de este caso es:



La desintegración  $\beta(-)$  se da en núcleos con “exceso” de neutrones, mientras que la  $\beta(+)$  se da en los núcleos con exceso de protones. Ejemplo es:

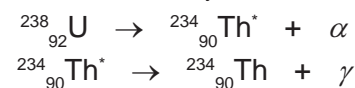


## Características de la emisión gamma

La mayor parte de los núcleos poseen “estados excitados”\*, menos estables (porque tienen más energía) que su “estado fundamental”. Un estado excitado sólo se diferencia del fundamental en la energía. Generalmente, en muy poco tiempo (en unos  $10^{-10}$  s), emiten la energía que “les sobra”, emitiendo un fotón de alta energía. Ese fotón es la radiación gamma. Este tipo de radiactividad suele ocurrir a continuación de una emisión alfa o beta. Por ejemplo, el U-238 puede emitir una partícula alfa convirtiéndose en Th-234. A continuación, en un tiempo muy breve, menos de una millonésima de segundo, el Th-234 emite un fotón gamma de 0,05 MeV

Los fotones gamma se diferencian de los fotones que emiten los átomos cuando ocurren las transiciones electrónicas en su cantidad de energía. Un fotón gamma tiene mucha más energía que el que procede de una transición de un electrón entre dos niveles electrónicos de un átomo. Un fotón de luz visible puede tener una energía de 2 eV; uno de luz ultravioleta una energía de 6 eV mientras que un fotón gamma puede tener una energía de 50 eV.

\* Para indicar que un núcleo está en estado excitado se indica como un asterisco. Así, podríamos representar la emisión descrita en el texto adjunto:



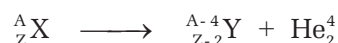
## 4.2 Leyes de Soddy. Series radiactivas

El fenómeno de la radiactividad implica transformaciones en el núcleo y por tanto cambios en el número atómico ( $Z$ ) cuando sucede la emisión de partículas alfa y beta.

Como consecuencia de las transformaciones nucleares aparecen nuevos elementos radiactivos, para los que no existían huecos en la Tabla Periódica, que poseían propiedades químicas idénticas a los elementos ya conocidos, pero propiedades físicas (como la masa, la radiactividad, etc.) diferentes. Soddy llamó «isótopos» a estos elementos que poseían el mismo  $Z$  (la misma carga nuclear) y que por lo tanto ocuparían el mismo lugar en la Tabla Periódica.

Soddy propuso un mecanismo\* para estas transformaciones que se conoce como las «leyes del desplazamiento», enunciadas así:

1ª: Cuando un núcleo de número másico  $A$  y número atómico  $Z$  emite una partícula alfa se transforma en otro de número másico ( $A-4$ ) y de número atómico ( $Z-2$ ), situado dos lugares antes en la Tabla Periódica.



2ª: Cuando un núcleo emite una partícula beta, se transforma en otro de igual número másico  $A$ , y de número atómico ( $Z+1$ ), situado un lugar después en la Tabla Periódica:



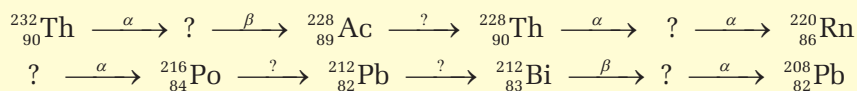
3ª: La emisión de una partícula gamma no altera ni el número másico ( $A$ ) ni el número atómico ( $Z$ ).

\* El mérito de las leyes de desplazamiento de Soddy es que cuando se propusieron aún no estaba completamente clara la naturaleza de las partículas alfa y beta ni la propia naturaleza del núcleo. De hecho, las leyes de Soddy contribuyeron a aclarar la naturaleza de esas partículas.





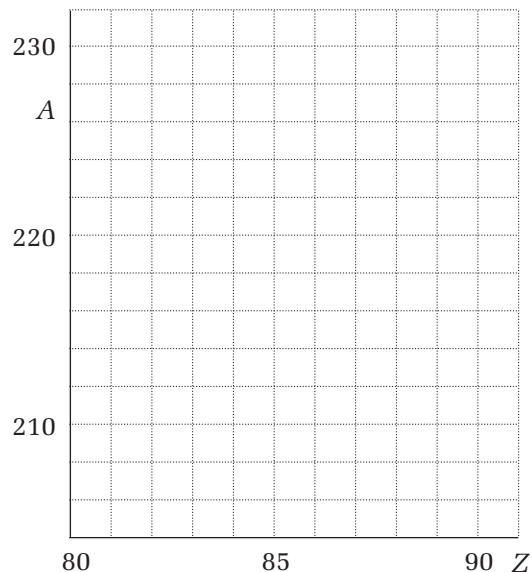
**A.14.-** a) La tercera serie radiactiva natural se origina en el torio-232. Completa la siguiente secuencia, indicando las partículas alfa o beta emitidas y los átomos intermedios.



b) Representa la serie del torio-232 en unos ejes de coordenadas tal como se hizo para la serie del uranio.

c) Calcula la energía que se emitirá cuando un átomo de Th-228 pase a Ra-224. Idem para cuando lo haga un átomo de Rn-220 a Po-216. Idem para cuando un átomo de Pb-212 pase a Bi-212.

c)  $\Delta E = 5,52 \text{ MeV}$ ;  $\Delta E = 7,34 \text{ MeV}$ ;  $\Delta E = 0,57 \text{ MeV}$



### 4.3 Ley de la desintegración

La desintegración radiactiva es un proceso estadístico (de azar); no podemos saber cuándo se desintegra un átomo aislado, pero sí podemos conocer qué proporción de un gran número de átomos sufrirá el proceso durante un tiempo determinado.

Se llama **actividad o velocidad de desintegración** ( $-dN/dt$ )\* de una sustancia radiactiva al número de átomos que se desintegran por unidad de tiempo. La unidad de actividad es el becquerel (Bq) que es la actividad de una muestra que experimenta una desintegración/segundo. Un múltiplo es el curie (Ci), también llamado curio, que equivale a  $3,7 \cdot 10^{10}$  desintegraciones/segundo. El valor de la actividad depende del número de átomos presentes ( $N$ ) y de una constante característica de cada elemento, la **constante de desintegración** ( $\lambda$ ) lambda, que representa la fracción de átomos que se desintegran por segundo por cada átomo radiactivo presente en la muestra:

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

Integrando la expresión anterior obtenemos la relación entre el número de átomos iniciales  $N_0$ , y el número de átomos que queda,  $N$ , al cabo de un tiempo  $t$ ,

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

**Período de semidesintegración** ( $T_{1/2}$ ) es el tiempo necesario para que el número de átomos se reduzca a la mitad del inicial, es decir, para que  $N = N_0/2$ . Sustituyendo en la expresión anterior:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}; \quad \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}; \quad -\ln 2 = -\lambda T_{1/2}; \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

**Vida media** ( $\tau$ ) es el valor promedio de la vida de los átomos de una especie radiactiva y viene dada por la suma de los tiempos de existencia de cada uno de los átomos, dividida por el número inicial de átomos existentes en la respectiva especie radiactiva. Su relación con la constante de desintegración es:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

\* El signo menos se introduce para hacer que la actividad sea un número positivo, aunque esté definida en función de la disminución de átomos radiactivos presentes, que es un número negativo.

\*Un curio corresponde a la actividad de 1 gramo de radio.

## EJEMPLO

La contaminación provocada por el desastre de Chernóbil alcanzó zonas muy lejanas de la central. Uno de los componentes volátiles causantes de esta contaminación fue el cesio-137.

a) Explica que quiere decir que el periodo de semidesintegración del cesio es de 30 años. Escribe la ecuación que representa la emisión beta que sufre el cesio.

b) Calcula la vida media de un átomo de cesio. ¿Qué significa?

c) Si la actividad cerca de Barcelona, varios días después del accidente (1986) era de 200 Bq/m<sup>2</sup>, ¿cuál sería la actividad en ese mismo sitio 30 años después? ¿y 15 años después, aproximadamente en el año 2001?

a) La mitad de los átomos de cesio que haya en un momento dado sufren el proceso de emisión beta en los próximos 30 años. Por lo tanto, después de 30 años tendremos la mitad de átomos de cesio de los que teníamos al principio. El proceso de emisión beta lo podemos escribir:



b) La vida media de un átomo de cesio es igual a la inversa de la constante de semidesintegración, que a su vez está relacionado con el periodo; así:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{0,693} = 43,29 \text{ años}$$

Quiere decir que cada átomo tardará, por término medio, 49,26 años antes de sufrir una emisión beta. Es algo así como la esperanza de vida de la población.

c) La actividad 30 años después sería exactamente la mitad, puesto que quedarán la mitad de átomos de cesio que había al principio. Es decir, que la actividad pasará de 200 a 100 Bq/m<sup>2</sup>.

¿Qué habrá pasado a los 15 años? Es **erróneo** decir que si en 30 años la actividad ha disminuido 100 unidades, en 15 años disminuirá sólo 50 unidades, suponiendo una relación lineal entre el número de átomos y el tiempo.

Para hacerlo correctamente podemos seguir los siguientes pasos:

1) Calculamos la constante de desintegración  $\lambda$  a partir de  $T_{1/2}$ :

$$\lambda = 0,693/T_{1/2} = 6,437 \cdot 10^{-10} \text{ s}^{-1}$$

2) Puesto que sabemos la actividad inicial podemos calcular el número de átomos iniciales:

$$A_0 = \lambda N_0; 200 = 6,437 \cdot 10^{-10} N_0; N_0 = 3,107 \cdot 10^{11} \text{ átomos/m}^2$$

3) Para calcular los átomos/m<sup>2</sup> de cesio-137 que quedan a los 15 años utilizamos la expresión:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}; N = 3,107 \cdot 10^{11} \cdot e^{-(0,693/30) 15} = 2,291 \cdot 10^{11} \text{ átomos/m}^2$$

Es un número razonable, ya que quedan menos átomos que había al principio, pero más de la mitad ya que todavía no han pasado 30 años.

4) Para calcular la actividad a los 15 años usamos la expresión:

$$A (15 \text{ años}) = \lambda N_{15 \text{ años}} = (6,437 \cdot 10^{-10}) \cdot (2,291 \cdot 10^{11}) = 147,5 \text{ Bq/m}^2$$

*Nota:  $\lambda$  puede expresarse en  $\text{s}^{-1}$  o en  $\text{años}^{-1}$ , dependiendo de que el tiempo se exprese en segundos o en años.*

**A.15.-** El período de semidesintegración del radón-222 es 3,82 días. Determina la constante de desintegración así como la actividad de una muestra de 10 miligramos de radón.

$$\lambda = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}; A = 5,69 \cdot 10^{13} \text{ Bq} = 1,54 \cdot 10^3 \text{ Ci}$$

**A.16.-** Hace poco más de un siglo, los esposos Curie obtuvieron 100 mg de cloruro de radio puro. Si el periodo de semidesintegración del radio es de 1630 años y la masa molecular del cloruro de radio 297:

- Calcula la actividad de la muestra de radio en aquel momento.
- Calcula la masa de cloruro de radio que quedará un siglo después.

$$A = 0,0738 \text{ Ci}; m (\text{RaCl}_2) = 96 \text{ mg}$$

**A.17.-** La vida media de los átomos de Ag-108 es de 2,30 minutos. Calcula:

- La constante de desintegración.
- El número de átomos y gramos de Ag-108 radiactiva, en una muestra que tenga una actividad de 3 Ci.

$$\lambda = 0,00725 \text{ s}^{-1}; 1,53 \cdot 10^{13} \text{ átomos}; m = 2,74 \cdot 10^{-9} \text{ g}$$

**A.18.-** a) Si tenemos 100 g de una sustancia radiactiva cuyo período de semidesintegración es 10 años, calcula la cantidad de esa sustancia que quedará a los 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 y 100 años.

b) Representa los datos anteriores en una gráfica en la que la ordenada represente la masa de sustancia radiactiva que va quedando y en abcisas se represente el tiempo.

- 50; 25; 12,5; 6,25; 3,125; 1,562; 0,781; 0,391; 0,195; 0,097 g

**A.19.-** Obtenido radio puro, calcula la fracción de él que permanecerá inalterado al cabo de 50, 100 y 1000 años. ( $T_{1/2 \text{ Ra}} = 1620 \text{ años}$ ).

$$97,9 \%; 95,8 \%; 65,2 \%$$

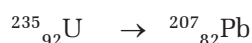
En los reactores nucleares de fisión, se produce plutonio-239 como uno de los subproductos del proceso. El período de semidesintegración del plutonio-239 es de 24.000 años. Por lo tanto, el plutonio que se está produciendo en las centrales actuales seguirá existiendo en cantidades muy apreciables durante cientos de miles de años. ¿Somos conscientes del riesgo que eso supone?

**A.20.-** Contesta las preguntas con las que iniciábamos el estudio de la radiactividad:

- ¿Qué es la radiactividad?
- ¿Hay energía asociada a los fenómenos radiactivos?
- ¿Son peligrosas las sustancias radiactivas?
- ¿Tiene alguna utilidad la radiactividad?
- ¿Podemos eliminar la radiactividad de una sustancia mediante una reacción química con una sustancia que no sea radiactiva?
- Las sustancias que son radiactivas, ¿dejan de serlo alguna vez? ¿Cuánto dura la radiactividad de una sustancia?

## ACTIVIDADES DE RECAPITULACIÓN

- ¿Qué ocurre cuando un núclido emite una partícula alfa? ¿Y cuando emite una partícula beta?
  - Calcule el número total de emisiones alfa y beta que permitirían completar la transmutación:



2. a1) Describa la naturaleza y características de las partículas alfa y beta.

b1) ¿Cómo se explica que un núcleo emita partículas beta si, en un modelo simple, se admite que está formado por protones y neutrones?

a2) Indique las características de las radiaciones alfa, beta y gamma.

b2) Explique los cambios que ocurren en el núcleo al experimentar una desintegración beta.

a3) Describa el origen y las características de los procesos de emisión radiactiva alfa, beta y gamma.

b3) Indique el significado de las siguientes magnitudes: período de semidesintegración, constante radiactiva y vida media.

3. El  $^{14}_6\text{C}$  se desintegra dando  $^{14}_7\text{N}$  y emitiendo una partícula beta. El período de semidesintegración del  $^{14}_6\text{C}$  es de 5376 años.

a) Escriba la ecuación del proceso de desintegración y explique cómo ocurre.

b) Si la actividad debida al  $^{14}_6\text{C}$  de los tejidos encontrados en una tumba es del 40% de la que presentan los tejidos similares actuales, ¿cuál es la edad de aquellos?

$$t = 7108 \text{ años}$$

4. El  $^{99}_{43}\text{Tc}$  se desintegra emitiendo radiación gamma.

a) Explique el proceso de desintegración y defina "período de semidesintegración".

b) Calcule la actividad de un gramo de isótopo cuya vida media en el estado inicial es de 6 horas.

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}; A = 2,82 \cdot 10^{17} \text{ Bq} = 7,6 \cdot 10^6 \text{ Ci}$$

5. El período de semidesintegración de un nucleido radiactivo, de masa atómica 200 u, que emite partículas beta es de 50 s. Una muestra, cuya masa inicial era 50 g, contiene en la actualidad 30 g del nucleido original.

a) Indique las diferencias entre el nucleido original y el resultante y represente gráficamente la variación con el tiempo de la masa de nucleido original.

b) Calcule la antigüedad de la muestra y su actividad actual.  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

$$t = 36,8 \text{ s}; A = 12,5 \cdot 10^{20} \text{ Bq} = 3,38 \cdot 10^{10} \text{ Ci}$$

6. a) La masa de un núcleo atómico no coincide con la suma de las masas de las partículas que los constituyen. ¿Es mayor o menor? ¿Cómo justifica esa diferencia?

b) ¿Qué entiende por estabilidad nuclear? Explique, cualitativamente, la dependencia de la estabilidad nuclear con el número másico?

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

a) Indique el tipo de emisión radiactiva y escriba la ecuación de dicha reacción nuclear.

b) Calcule la energía liberada en el proceso.

$^{226}\text{Ra}$ : 226,0960 u;  $^{222}\text{Rn}$ : 222,0869 u;  $^4\text{He}$ : 4,00387 u; 1 u =  $1,66 \cdot 10^{-27}$  kg;  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s

$$\Delta E = 7,81 \cdot 10^{-13} \text{ J/núcleo} = 4,87 \text{ MeV/núcleo}$$

8. Razone si las siguientes afirmaciones son ciertas o falsas:

a1) La masa del núcleo de deuterio es menor que la suma de las masas de un protón y un neutrón.

b1) Las interacciones principales en los dominios atómico, molecular y nuclear, son diferentes.

a2) Una vez transcurridos dos períodos de semidesintegración, todos los núcleos de una muestra radiactiva se han desintegrado.

b2) La actividad de una muestra radiactiva es independiente del tiempo.

a3) Escriba la expresión de la ley de desintegración radiactiva e indique el significado de cada uno de los símbolos que en ella aparecen.

b3) Dos muestras radiactivas tienen igual masa. ¿Puede asegurarse que tienen igual actividad?

9. a) Justifique cuantitativamente cuál de los núclidos  $^{16}_8\text{O}$  y  $^{218}_{84}\text{Po}$  es más estable.

b) En la desintegración del núcleo  $^{218}_{84}\text{Po}$  se emiten una partícula alfa y dos partículas beta, obteniéndose un nuevo núcleo. Indique las características de dicho núcleo resultante. ¿Qué relación existe entre el núcleo inicial y el final?

$m(^{16}_8\text{O}) = 15,994915$  u;  $m(^{218}_{84}\text{Po}) = 218,009007$  u;  $m_p = 1,007825$  u;  $m_n = 1,008665$  u;

Es más estable el O-16 pues su  $B/A = 7,98$  MeV/nucleón, mientras que la del Po-218 es de 7,73 MeV/núcleo

Núcleo	A	masa (u)	Núcleo	A	masa (u)
electrón	0	0,000549	plata	107	106,9051
protón	1	1,00727	plata	108	107,905953
p + electrón	1	1,007825	xenon	136	135,9072
neutrón	1	1,008665	xenon	140	139,9196
hidrógeno	1	1,007825	cesio	140	139,91676
deuterio	2	2,014102	bario	138	137,905235
tritio	3	3,016049	bario	141	140,91415
helio	3	3,01603	bario	142	141,91651
helio	4	4,00260	mercurio	202	201,970643
litio	7	7,01601	plomo	206	205,974475
nitrógeno	14	14,00307	plomo	210	209,984130
oxígeno	16	15,99492	plomo	212	211,991901
oxígeno	17	16,99913	plomo	214	213,999842
oxígeno	18	17,99916	bismuto	210	209,984130
neón	20	19,99244	bismuto	212	211,991286
sodio	23	22,98977	bismuto	214	213,998730
magnesio	23	22,994125	polonio	210	209,982883
magnesio	24	23,985042	polonio	214	213,995212
cloro	35	34,96885	polonio	216	216,001917
cloro	37	36,96590	polonio	218	218,009007
hierro	55	54,9382951	radón	220	220,011396
hierro	56	55,9349339	radón	222	222,017608
kriptón	91	90,92324	radio	224	224,020212
kriptón	92	91,926153	radio	226	226,025436
kriptón	95	94,90000	torio	228	228,028738
rubidio	93	92,92157	torio	230	230,033157
estroncio	90	89,90775	torio	234	234,043633
estroncio	94	93,97540	protactinio	234	234,043352
rutenio	100	99,904217	protactinio	237	237,05122
			uranio	234	234,040975
			uranio	235	235,043944
			uranio	238	238,050816

Elemento	Tipo de desintegración	$T_{1/2}$	Aplicaciones
uranio-238	$\alpha, \gamma$	$4.5 \cdot 10^9$ años	Reactores nucleares
plutonio-239	$\alpha, \gamma$	24.300 años	Reactores y bombas nucleares
radio-226	$\alpha$	1620 años	Radioterapia
radón-222	$\alpha$	3,82 días	
azufre-35	$\beta$	87,0 días	
sodio-24	$\beta, \gamma$	15,0 horas	Circulación sangre
oro-198	$\beta, \gamma$	2,7 días	Localización tumores
yodo-131	$\beta$	8 días	Hipertiroidismo
bario-140	$\beta$	12,8 días	Circulación oleoductos
fósforo-32	$\beta$	14,3 días	Autorradiografías
iridio-192	$\beta$	70 días	Radiografía industrial
calcio-45	$\beta$	165 días	Metabolismo huesos
cobalto-60	$\beta, \gamma$	5,27 años	Radioterapia
cesio-137	$\beta$	30 años	Radioterapia
carbono-14	$\beta$	5730 años	Geocronología