

4 | La física nuclear



El impulso proveniente de la física cuántica derivó en el estudio exhaustivo de la estructura del átomo, sus componentes esenciales y las múltiples aplicaciones que se insinuaban en las implicaciones teóricas acerca de la energía del átomo.

Inicialmente, el desarrollo experimental de la física nuclear se produjo en el campo de las aplicaciones bélicas. Con posterioridad, la búsqueda de una fuente de energía capaz de asumir las crecientes necesidades de la sociedad encontró en la estructura atómica la solución a los problemas planteados. El camino aún no ha sido del todo recorrido. Incidentes como el de Chernóbil siguen impulsándonos a buscar fuentes de energía más limpias.

La física nuclear, a través del conocimiento de la multitud de partículas que forman el átomo, es capaz de explicar el origen del universo, o de construir una tecnología con la que revolucionar las técnicas médicas del siglo **xxi**. Las multimillonarias inversiones realizadas en este campo se orientan en este sentido.



1 | La física nuclear. La constitución del átomo

Un **átomo** está constituido por un **núcleo**, formado por **protones** y **neutrones (nucleones)**, que ocupa la parte central del átomo, y por una **envoltura**, formada por los **electrones**.

Partícula	Masa en reposo (kg)	Carga (C)
Protón	$1,67 \times 10^{-27}$	$+1,6 \times 10^{-19}$
Neutrón	$1,67 \times 10^{-27}$	0
Electrón	$9,11 \times 10^{-31}$	$-1,6 \times 10^{-19}$

Un átomo es eléctricamente neutro, por lo que el número de protones del núcleo es igual al de electrones de la envoltura electrónica. El núcleo atómico ocupa una fracción mínima del volumen total del átomo, concretamente, es unas 100 000 veces menor. En cambio, la masa de los electrones es insignificante comparada con la del protón o la del neutrón. Casi toda la masa del átomo se encuentra en el núcleo, que posee una gran densidad.

Se denomina **número atómico** al número de protones que posee el núcleo de un átomo.

Un **elemento químico** es una sustancia pura que está formada por átomos que tienen el mismo número atómico. A cada elemento le corresponde un número atómico. Se simboliza con la letra **Z**.

Un elemento queda caracterizado por el número de protones que poseen sus átomos; sin embargo, los átomos de un mismo elemento pueden tener diferente número de neutrones. Los isótopos son átomos de un mismo elemento que tiene diferente número de neutrones. El número de protones más el de neutrones del núcleo de un átomo recibe el nombre de número de masa o **número másico**. El número másico es siempre un número natural y se simboliza con la letra **A**.

La mayoría de los elementos están constituidos por mezclas de isótopos. Para indicar el número de masa de cada isótopo, se escribe primero el nombre del elemento y después el número másico, separados mediante un guión.

Los isótopos pueden ser **estables** o **inestables**. La inestabilidad de algunos isótopos da lugar al fenómeno físico conocido como **radiactividad**.

Isótopo	Símbolo	Número de protones	Número de neutrones	Número másico
Oxígeno-16	$^{16}_8\text{O}$	8	8	16
Oxígeno-18	$^{18}_8\text{O}$	8	10	18
Hidrógeno-1	^1_1H	1	0	1
Hidrógeno-2	^2_1H	1	1	2
Hidrógeno-3	^3_1H	1	2	3
Uranio-238	$^{238}_{92}\text{U}$	92	146	238
Polonio-214	$^{214}_{84}\text{Po}$	84	130	214



2 | La radiactividad

La radiactividad natural es el fenómeno de la transformación (o transmutación) nuclear espontánea. Es decir, un núcleo de un átomo se transforma espontáneamente en otro, sin ayuda exterior alguna. En el fenómeno de la radiactividad, átomos de un elemento se transforman en átomos de otro elemento.

En esta transmutación nuclear espontánea se emiten –o sea, salen del núcleo del átomo– partículas a gran velocidad. Las más corrientes son los electrones, llamadas partículas β (o **radiación β**) y los núcleos de helio (formados por 2 protones y 2 neutrones), denominados partículas α (o **radiación α**). La emisión de partículas va acompañada de la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas, **radiación gamma, γ** .

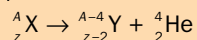
Los átomos de los elementos que sufren esta transmutación o **desintegración** se llaman **radiactivos**. La radiactividad puede ser natural o artificial (provocada).

Al colocar una muestra de un metal radiactivo o un compuesto químico de ese metal dentro de un recipiente de plomo de paredes gruesas, intercambiando un campo eléctrico, tal como se indica en la figura 1, la radiación emitida se escinde o separa en tres, como se comprueba por las marcas que dejan en la placa fotográfica.

La radiación que se desvía hacia el polo positivo del campo eléctrico se llamó beta (β); la que lo hace hacia el negativo alfa (α); y la que no sufre desviación, radiación gamma (γ). Al investigar más tarde la naturaleza de estas radiaciones, Rutherford y Royds, en 1909, demostraron que la radiación α estaba constituida por partículas materiales, cada una de las cuales era un ión positivo de helio, He^{2+} .

Las radiaciones γ son ondas electromagnéticas análogas a las de la luz, pero de menor longitud de onda.

La **desintegración α** consiste en la emisión de un núcleo de helio (${}^4_2\text{He}$), formándose un elemento diferente al anterior, según la reacción nuclear:

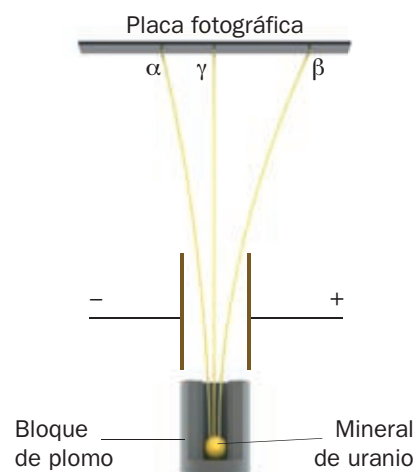


El nuevo átomo que se forma corresponde al elemento químico situado dos lugares antes en la tabla periódica (primera ley de Soddy). Las partículas α salen del núcleo a una velocidad cercana a 20 000 km/s. Poseen, pues, gran energía y son capaces de atravesar láminas de aluminio de 0,1 mm de espesor. Al ser partículas cargadas, pueden ionizar directamente la materia que tocan, aunque tienen poco alcance, ya que van perdiendo energía cinética en el proceso de ionización. Una radiación alfa de 5 MeV es frenada después de haber atravesado 3,5 cm de aire a la presión de una atmósfera y a una temperatura de 15 °C, habiendo sufrido suficientes colisiones con electrones atómicos para producir unos 150 000 pares de iones a lo largo de su trayectoria.

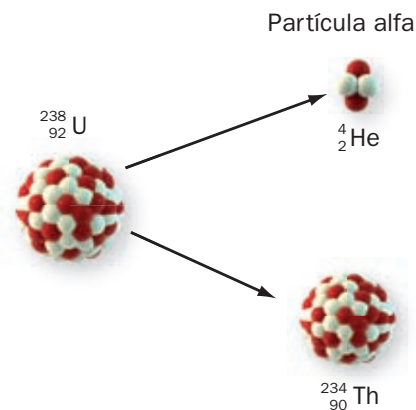
La energía de la radiación no se suele expresar en julios, sino que se usan como unidades el mega-electrón-voltio (MeV) y el giga-electrón-voltio (GeV). Todas ellas derivan del electrón-voltio.

$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

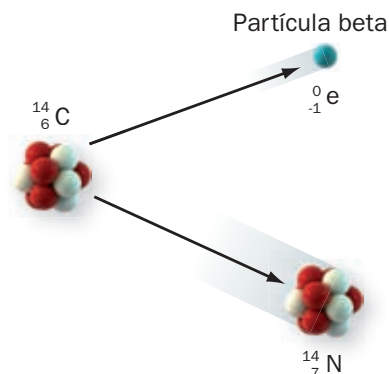
La radiactividad natural fue descubierta, en 1896, por Becquerel, en París, e investigada por los esposos Curie (Marie Skłodowska (1867-1934) y Pierre Curie (1859-1906)), André Debierne (1874-1949) y Ernest Rutherford (1871-1937), entre otros. La primera sustancia en la que se descubrió esta propiedad fue la pechblenda, mineral de uranio. Después, los esposos Curie descubrieron que todos los minerales de uranio y torio la poseían. Igualmente, todos los compuestos de radio y actinio son radiactivos.



1. Las desviaciones que experimentan las radiaciones emitidas por un material radiactivo natural permiten identificar los rayos α como partículas positivas, los rayos β como partículas negativas y los rayos γ como neutros.

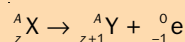


2. Ejemplo de emisión α : cuando un núcleo de uranio-238 emite una partícula α se convierte en un núcleo de torio-234.



3. Ejemplo de emisión β : cuando un núcleo de carbono-14 emite una partícula β , se transforma en un núcleo de nitrógeno-14. Observa que, para simbolizar un electrón, se ha escrito $^0_{-1}\text{e}$, ya que su número de masa es 0 y tiene una carga negativa. Para formular una transmutación nuclear o reacción nuclear, se ha convenido que los núcleos que participan en el fenómeno radiactivo se representen con el símbolo del elemento químico al que pertenece el núcleo considerado. El símbolo tiene un superíndice (número de masa) y un subíndice (número atómico). Para que una reacción nuclear esté bien igualada, debe cumplirse que la suma de los superíndices del segundo miembro sea igual a la suma de los del primer miembro. Esta misma condición es válida para los subíndices, ya que los protones y los neutrones pueden transformarse entre sí, pero no se crean ni se destruyen en los procesos radiactivos.

La **radiación β** consiste en la emisión de un electrón, causada por la transformación de un neutrón del núcleo en un protón y un electrón:

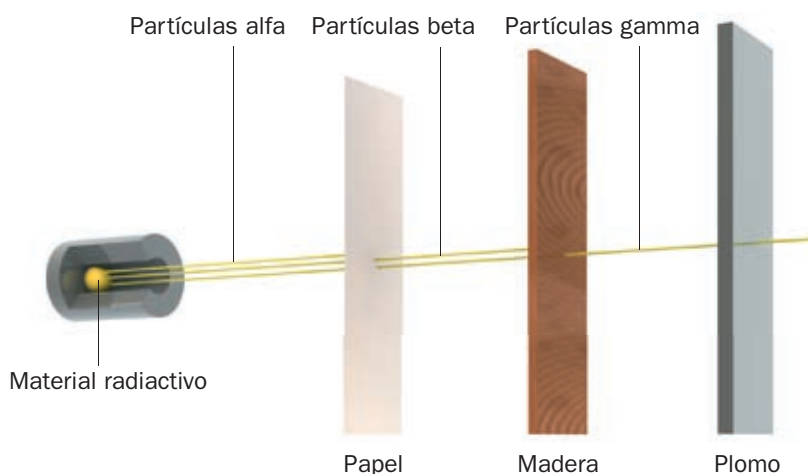


En este tipo de desintegración, un neutrón del núcleo emite un electrón y se transforma en un protón (segunda ley de Soddy). Por tanto, cuando un átomo de un elemento radiactivo emite una partícula β , se transforma en un átomo de otro elemento que tiene un protón más –su número atómico aumenta en una unidad– y su número de masa queda igual; es decir, la masa isotópica prácticamente no varía a causa de la insignificante masa del electrón emitido. En la tabla periódica, el nuevo átomo formado es del elemento situado un lugar a la derecha en la clasificación periódica (Fig. 3). A pesar de que la masa atómica de los átomos formados por desintegración β sea prácticamente igual a la de su progenitor, las propiedades físicas y químicas de ambos son distintas, ya que pertenecen a dos elementos diferentes. Después de la emisión de una partícula α o β , el nuevo núcleo formado suele quedar excitado y emite el exceso de energía en forma de radiación γ .

Las radiaciones β son electrones que salen del núcleo a velocidades próximas a las de la luz. Poseen menos energía que las partículas α , pero son más penetrantes. Las partículas β , al estar cargadas, ionizan la materia, siendo visibles sus efectos por el efecto calórico de esta. Provocan ciertas reacciones químicas y variaciones estructurales en la materia que atraviesan.

En la desintegración β se desprende, además del electrón, un **antineutrino**. Actualmente se sabe que la masa de los antineutrinos es más de 10 000 veces menor que la del electrón.

La **radiación γ** se origina en el núcleo cuando este pasa de estados de alta energía a otros de energía menor. Es altamente energética y penetra en la materia mucho más que las otras radiaciones.



4. Las partículas α son las que poseen menor poder de penetración. Las radiaciones γ no tienen carga ni masa y son las más penetrantes.

Los átomos de un elemento radiactivo no se desintegran todos al mismo tiempo, pues lo hacen gradualmente.

Todo elemento radiactivo se halla caracterizado por su **tiempo de semidesintegración** (o **período de semidesintegración**), que es el tiempo que una determinada cantidad de elemento radiactivo se reduce a la mitad, por haberse desintegrado la otra mitad. Se simboliza por $t_{1/2}$, $T_{1/2}$ o T .



El tiempo de semidesintegración es independiente de las condiciones externas, tales como presión, temperatura y composición química de la muestra. Así, por ejemplo, el tiempo de semidesintegración del $^{226}_{88}\text{Ra}$ es 1 620 años. Esto significa que, de una cantidad dada de Ra, se habrá desintegrado la mitad al cabo de 1 620 años y que, de la mitad restante, al cabo de otros 1 620 años se desintegrará la mitad, es decir, la cuarta parte de la cantidad inicial, y así sucesivamente.

Observa que la velocidad con la que se desintegra el Ra (velocidad que podría medirse por el número de núcleos de radio que se desintegran por segundo), disminuye con el tiempo, ya que esa velocidad depende del número de átomos radiactivos presentes todavía no desintegrados (Fig. 5).

La función que relaciona el número de núcleos aún no desintegrados con el tiempo transcurrido es la **ley de desintegración radiactiva**:

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

N son los núcleos que quedan por desintegrar; N_0 es la cantidad de núcleos iniciales; t es la variable tiempo y λ , la llamada **constante radiactiva**, característica de cada material. Podemos relacionar esta constante con el período de semidesintegración, T , si tenemos en cuenta que para $t = T$, $N = N_0/2$, sustituyendo estos valores en la ecuación anterior:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T}$$

Luego:

$$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = \ln e^{-\lambda T}$$

Y:

$$\ln\left(\frac{1}{2}\right) = -\lambda T$$

Podemos afirmar:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

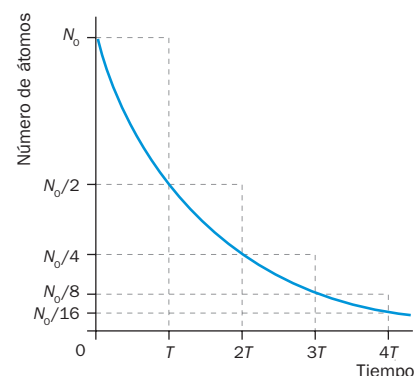
Se define, la **vida media** τ de un núcleo radiactivo como el tiempo medio necesario para que se produzca un decaimiento de unidades en el número original de átomos. Si tenemos en cuenta que τ es la probabilidad de que ocurra una desintegración por unidad de tiempo:

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

La **actividad de una muestra radiactiva**, $A(t)$, es el número de desintegraciones por unidad de tiempo que tienen lugar. Es la velocidad de desintegración y sus unidades fundamentales son el *becquerel* (Bq), que es una desintegración por segundo, el *curie* ($3,67 \times 10^{10}$ Bq) y el *rutherford* (10^8 Bq). En valor absoluto, tenemos:

$$A(t) = \frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N(t)$$

El conocimiento del fenómeno de la desintegración radiactiva y de su correspondiente ley nos permite saber la edad de una determinada muestra a través de los núcleos que quedan por desintegrar. El método que nos permite determinar el tiempo que lleva una muestra descomponiéndose lo



5. N_0 es el número de átomos presentes inicialmente y T es el tiempo o período de semidesintegración. Observa que la curva obtenida se acerca al eje de abscisas sin llegar a alcanzarlo, lo cual significa que la desintegración radiactiva jamás es completa.



es la **radiodatación**, que resulta extremadamente útil para campos como la arqueología y la geología.

Uno de los isótopos más usados para la datación es el **carbono-14**. La relación entre los átomos de carbono-14 y carbono-12 es prácticamente la misma en todos los seres vivos. Cada átomo de carbono-14 que se desintegra es reemplazado por otro, de forma que la cantidad permanece constante a lo largo de toda la existencia del ser vivo. Sin embargo, cuando los organismos vegetales o animales mueren, el carbono-14 ya no puede reemplazarse en los tejidos. Los átomos de carbono-14 se desintegran con un período de semidesintegración de 5370 años.

Esto nos permite averiguar la edad que tiene un fósil. **Willard F. Libby** fue el primero en usar esta técnica en 1946, la cual se puede aplicar en huesos, madera, ceniza, semillas, etc.

EJEMPLO

1. Una excavación arqueológica en tierras egipcias ha revelado un gran número de hallazgos de una época desconocida. Si la concentración de carbono-14 en la madera de un ataúd encontrado es de un 61 % respecto a la concentración actual de la misma madera, ¿de qué año podemos pensar que es el ataúd?

T (carbono-14) = 5370 años.

La constante radiactiva puede encontrarse:

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} \rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{\ln 2}{5370 \text{ años}} = 1,29 \times 10^{-4} \text{ años}^{-1}$$

Siguiendo la ley de desintegración radiactiva:

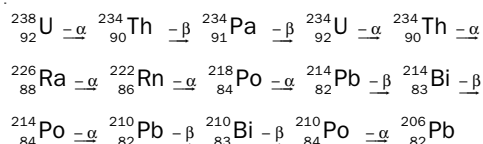
$$N = N_0 e^{-\lambda T} \rightarrow \frac{61N_0}{100} = N_0 e^{-1,29 \times 10^{-4} \text{ años}^{-1} \times t} \rightarrow t = \frac{\ln\left(\frac{61}{100}\right)}{1,29 \times 10^{-4} \text{ años}^{-1}} \approx 3831 \text{ años}$$

El año que podemos suponer es el 1823 a. C.

Suele ocurrir que el elemento obtenido en una desintegración radiactiva es, a su vez, radiactivo y se desintegra en otro nuevo elemento que vuelve a ser radiactivo. Se inicia, así, una cadena de desintegraciones a partir de un elemento dado que acaba al obtenerse un núcleo estable.

Una **serie radiactiva** es el conjunto de elementos radiactivos que, procediendo uno de otro a través de la emisión de partículas α o β , enlazan la sustancia radiactiva de partida con el producto final, que no es radiactivo, sino estable.

Tres son las series radiactivas naturales que actualmente existen en la Tierra. Las tres terminan con el plomo, que es estable. Por ejemplo, la serie radiactiva que comienza con el $^{238}_{92}\text{U}$ y termina con el $^{206}_{82}\text{Pb}$ (estable) es:





Se comprueba, a la vista de la serie radiactiva indicada, que después de una emisión α , seguida de dos emisiones β , se forma un átomo con el mismo número de protones en el núcleo, pero distinto número de masa. Así, el ${}^{238}_{92}\text{U}$ pasa a ${}^{234}_{92}\text{U}$. Los dos átomos pertenecen al mismo elemento: son **isótopos**.

Se comprueba también que cuando un átomo emite una partícula β , se forma otro átomo de igual número de masa. Los átomos con igual número másico, pero que pertenecen a dos elementos distintos, son **isóbaros** (*iso* significa 'igual', *baros* significa 'peso'). El ${}^{234}_{90}\text{Th}$ y el ${}^{234}_{91}\text{Pa}$ son isóbaros.

Los esfuerzos del hombre para conseguir transformar artificialmente un elemento en otro se remontan a la época de los alquimistas e, incluso, a tiempos más remotos.

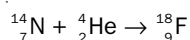
Puesto que un elemento está caracterizado por el número de protones, la síntesis de un nuevo elemento entraña variar el número de estas partículas en el núcleo del elemento de partida.

Para lograrlo, se intentó introducir dentro del núcleo estable protones, electrones o partículas alfa, con el fin de provocar en el núcleo una transmutación.

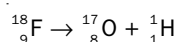
Las partículas utilizadas son **projectiles** que **bombardean** el núcleo, el cual se transforma y emite una partícula distinta.

En 1919, Rutherford logró, por primera vez, transformar artificialmente un elemento en otro.

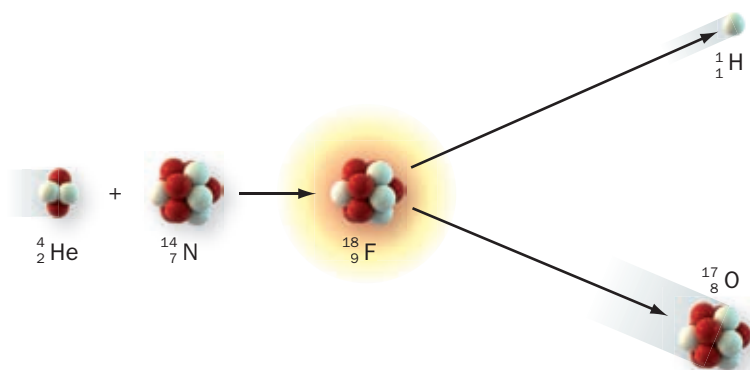
Al bombardear núcleos de átomos de ${}^{14}_7\text{N}$ con núcleos de helio, ${}^4_2\text{He}$ (partículas α), obtuvo ${}^{17}_8\text{O}$:



El flúor-18 obtenido es inestable y se transforma en oxígeno-17 y un protón:



El oxígeno-17 obtenido es estable, no radiactivo.



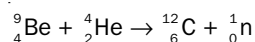
6. Primera transmutación nuclear provocada, conseguida por Rutherford en 1919. A partir de nitrógeno-14 se obtienen oxígeno-17 y un protón.

En los años siguientes a esta primera transmutación nuclear artificial o provocada, se efectuaron muchas reacciones nucleares, utilizando como blanco núcleos de otros elementos estables distintos del ${}^{14}_7\text{N}$.



7. Sir James Chadwick.

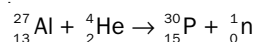
En 1932, **Chadwick**, colaborador de Rutherford, descubrió el **neutrón**, ${}^1_0\text{n}$, como partícula constitutiva del núcleo, al bombardear ${}^9_4\text{Be}$ con partículas α . En este caso, la reacción nuclear provocada es la siguiente:



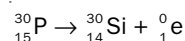
El bombardeo del ${}^9_4\text{Be}$ con partículas α constituye un método relativamente sencillo de obtención de neutrones, que sirven como proyectiles en las reacciones nucleares provocadas con gran ventaja sobre las otras partículas-proyectiles, ya que los neutrones, al no poseer carga, no sufren repulsión electrostática por parte del núcleo atómico bombardeado y pueden penetrar fácilmente en él.

Sir James Chadwick (1891-1974) fue el descubridor del neutrón (lo que le valió el Nobel de Física del año 1935) y del tritio. Posteriormente, se unió al Proyecto Manhattan que desarrolló la bomba atómica sobre Hiroshima y Nagasaki.

Desde 1919 hasta 1934 se realizaron muchas reacciones nucleares provocadas, pero los núcleos resultantes eran estables. En 1934, Irene **Curie** (hija de Pierre y Marie Curie) y su esposo Frédéric **Joliot** descubrieron que al bombardear una lámina de aluminio con partículas alfa se obtenía un isótopo del fósforo, ${}^{30}_{15}\text{P}$ y neutrones:



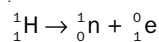
Pero el ${}^{30}_{15}\text{P}$ obtenido era radiactivo y se desintegraba espontáneamente con emisión de un **positrón** según:



El **positrón** es una partícula de masa igual a la del electrón pero de carga positiva: el positrón es la **antipartícula** del electrón.

Con este experimento se había descubierto la radiactividad artificial. El ${}^{30}_{15}\text{P}$ es el primer isótopo radiactivo obtenido artificialmente.

Para explicar la emisión de un positrón del núcleo se supone que este es creado en el momento de su emisión, debido a que un protón se transforma en un neutrón que queda en el núcleo y un positrón que sale del núcleo:



protón $\rightarrow$ neutrón + positrón

La desintegración nuclear en la que se obtiene un positrón se llama **desintegración beta positiva**.

A partir de 1934 se han realizado numerosos experimentos para encontrar nuevos isótopos radiactivos artificiales. Actualmente, se conocen más de 1200 (prácticamente, de todos los elementos). Algunos tienen tiempos de semidesintegración sumamente pequeños.



8. El matrimonio Joliot-Curie fue el primero en conseguir producir artificialmente elementos radiactivos, por lo que se le concedió el Premio Nobel de Química en 1935. Ambos trabajaron en diseñar las condiciones adecuadas para construir un reactor nuclear basado en reacciones en cadena.



Aplicaciones de los isótopos radiactivos en investigación y en medicina

Los isótopos radiactivos tienen muchas aplicaciones en casi todos los campos de las ciencias puras y aplicadas y de la tecnología. Se debe controlar su uso con todo rigor debido al peligro, incluso mortal, que implica su manipulación. Veamos algunas de sus aplicaciones.

Es posible **detectar trazas** de elementos químicos en una muestra de materia, bombardeándola con neutrones procedentes de una fuente radiactiva. Los tiempos de semidesintegración y el tipo de radiación emitida por estos átomos radiactivos se calculan y se procesan informáticamente.

Como esta información es característica de cada elemento, se puede conocer qué isótopos radiactivos se han formado y, por tanto, qué elementos se encontraban en la muestra original.

Esta técnica es sumamente sensible y permite detectar 1 ng de un elemento en una muestra.

Se utiliza en los grandes museos para investigar falsificaciones de obras de arte, así como en los laboratorios de la policía para analizar restos de materiales.

Una pequeña cantidad de un elemento radiactivo transuránico, cerrada en un envase convenientemente protegido, puede ser utilizada como **fuentes de energía**. Con la ayuda de aparatos adecuados, esta energía se convierte en electricidad. Esta energía «empaquetada» se utiliza en los satélites y naves espaciales. Las naves *Voyager I* y *Voyager II*, que se encuentran en estos momentos en los confines del sistema solar, se mantendrán operativas hasta el año 2020 aproximadamente, gracias al combustible nuclear de plutonio que transportan.

Los rayos γ , debido al gran poder de penetración que poseen, se utilizan en metalurgia para obtener radiografías de piezas metálicas y detectar, así, posibles defectos o fisuras en las piezas. Estas radiografías reciben el nombre de **gammagrafías**.

Los químicos y biólogos utilizan los llamados **radioisótopos trazadores** para estudiar los mecanismos de las reacciones químicas y las estructuras moleculares. Se «marca» uno de los reactivos con un isótopo radiactivo y se añade a la mezcla de la reacción. Cuando esta ha finalizado, se mide la radiación de cada uno de los productos. Comparándola con la radiación original, es posible comprender el mecanismo de la reacción. Las reacciones que comportan muchos pasos intermedios se pueden estudiar siguiendo este método.

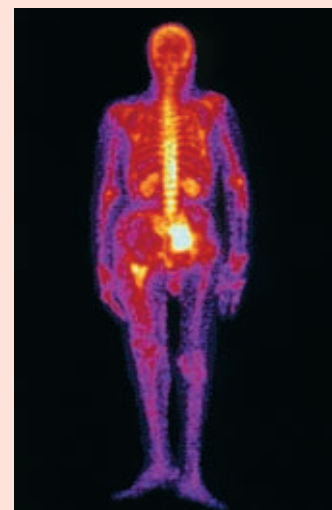
En la **investigación agrícola**, los isótopos radiactivos se utilizan para conocer los efectos de los herbicidas, pesticidas y fertilizantes en las plantas. El isótopo trazador se introduce en la planta a través de una de estas sustancias y, a continuación, se realiza un seguimiento dentro de la planta. Muy a menudo, el isótopo trazador también se sigue en los animales que consumen esas plantas, en el agua y en la tierra.

Es posible realizar el **diagnóstico de algunas enfermedades** utilizando isótopos radiactivos.

Así, por ejemplo, el yodo-131 se utiliza para detectar problemas de tiroides; el tecnecio-99, para detectar tumores óseos (Fig. I); y el fósforo-32, para detectar cáncer de piel.

En el **tratamiento del cáncer** se utiliza la característica propia de las radiaciones emitidas: pueden destruir materia viva. Los tejidos cancerosos, que se desarrollan a una velocidad anormal, son, en general, más sensibles a las radiaciones que los tejidos sanos. A pesar de lesionar localmente tejidos sanos por efectos de la radiación, la destrucción de las células cancerosas tiene un efecto general beneficioso para el organismo, que puede superar los daños causados.

I. Gammagrafía ósea. Imagen obtenida con un escáner de rayos γ de la radiación emitida por un hueso después de haber inyectado al paciente tecnecio-99. Los huesos cancerosos absorben el radioisótopo más intensamente y aparecen en la imagen como una zona más brillante.





II. La radioterapia es utilizada frecuentemente para el tratamiento del cáncer. La bomba de cobalto emite un intenso haz de radiación gamma que se dirige hacia los tejidos cancerosos y destruye la capacidad de reproducción de las células.

Un haz fino de rayos gamma de alta densidad, procedentes del cobalto-60 o del cesio-137, se dirige directamente hacia el tejido canceroso (Fig. II). Esta técnica es la **radioterapia**.

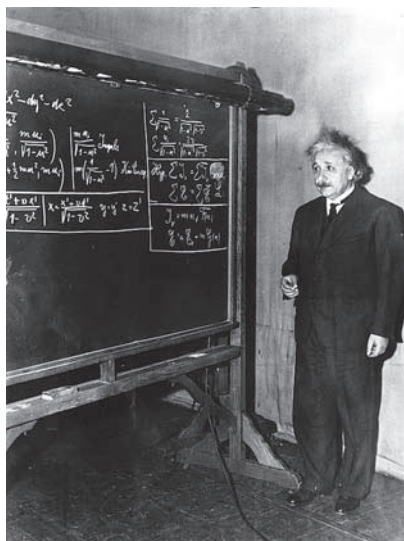
Algunas veces los radioisótopos se encierran en tubos de oro que se implantan directamente en el tumor. Las radiaciones que emiten destruyen las células cancerosas de su alrededor.

También existen fármacos que contienen radioisótopos de oro, de yodo o de fósforo, que se utilizan, en algunos casos, en terapias radiactivas. Así, el yodo-131 que se utiliza para detectar enfermedades de la glándula tiroides, también puede administrarse para su tratamiento.

3 | La equivalencia entre masa y energía

Albert Einstein formuló en 1905 la **relación de equivalencia entre masa y energía**. Esta relación se encuentra mediante la expresión:

$$E = m c^2$$



9. Einstein es, probablemente, el científico más popular de la historia. Su tardío reconocimiento no fue óbice para que recibiera el Premio Nobel de Física en 1921.

La energía es una propiedad de todo sistema físico, tenga o no tenga masa. Representa la energía total que podría obtenerse si se convirtiera toda la masa en energía. En física clásica la masa y la energía se conservan independientemente; es decir, en todo proceso físico se asume la conservación de la masa y la conservación de la energía.

El trabajo de Einstein une ambas leyes de conservación en una sola, lo que es esencial en las reacciones nucleares, ya que, si bien la conversión masa-energía es despreciable en las reacciones químicas, no lo es en reacciones nucleares.

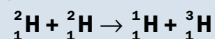
En algunas de estas, la suma de la masa de los protones y neutrones es distinta a la masa total de los núcleos atómicos. Estos núcleos no son estables y, al partirse, convierten parte de su masa en energía, tal y como ocurre en la **fisión** o en la **fusión** nuclear.

Hay procesos en los que toda la masa se transforma en energía. Es lo que ocurre en la aniquilación de partículas con sus respectivas antipartículas.



EJEMPLO

2. Determina la energía liberada en un proceso de fusión nuclear donde dos átomos de deuterio (${}^2_1\text{H}$) dan un átomo de hidrógeno-1 (${}^1_1\text{H}$) y uno de tritio (${}^3_1\text{H}$):



Las masas de los núcleos de hidrógeno, deuterio y tritio son, respectivamente:

$$1,007825 \text{ u}; 2,014102 \text{ u y } 3,016049 \text{ u}; 1 \text{ u} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg}; c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$$

La reacción no conserva la masa:

$$m_0 = 2 \times 2,014102 = 4,028204 \text{ u}$$

$$m_f = 3,016049 + 1,007825 = 4,023874 \text{ u}$$

Hay un **defecto de masa**, que en valor absoluto es:

$$|\Delta m| = |4,023874 - 4,028204| = 0,004330 \text{ u} \times \frac{1,66 \times 10^{-27} \text{ Kg}}{1 \text{ u}} = 7,19 \times 10^{-30} \text{ Kg}$$

Podemos calcular la energía que se desprende:

$$E = \Delta m c^2 = 7,19 \times 10^{-30} \text{ kg} \times (3,00 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 6,47 \times 10^{-13} \text{ J}$$

Es usual dar los valores de la energía en MeV:

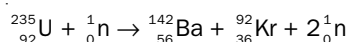
$$6,47 \times 10^{-13} \text{ J} \times \frac{1 \text{ eV}}{1,602 \times 10^{-19} \text{ J}} \times \frac{1 \text{ MeV}}{10^6 \text{ eV}} = 4,03 \text{ MeV}$$

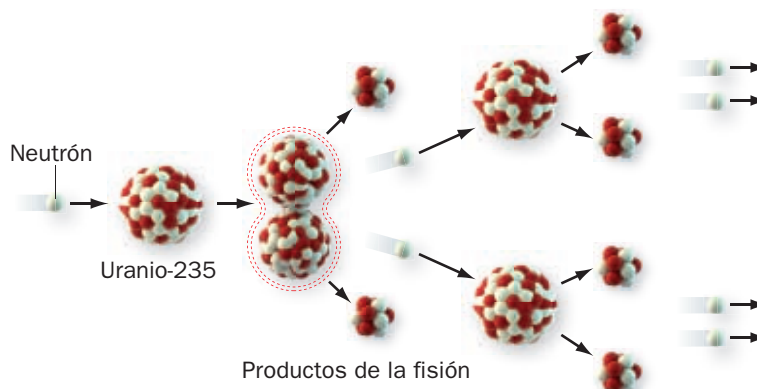
4 | La fisión y la fusión nuclear

Hasta 1938 las transmutaciones nucleares se realizaban en pequeña escala y la cantidad de elemento que se transmutaba por unidad de tiempo era muy reducida, debido a que una ínfima fracción de las partículas-proyectil hacían blanco en los núcleos bombardeados. A finales de 1938, poco antes de iniciarse la Segunda Guerra Mundial, O. Hahn, F. S. Strassmann y Lise Meitner descubrieron un nuevo tipo de transmutación nuclear. Estos investigadores comprobaron que, si los núcleos de uranio-235 absorbían un neutrón, se podían escindir (romper) en dos fragmentos aproximadamente iguales, escisión que comportaba un **gran desprendimiento de energía**.

La rotura del núcleo de uranio –llamada **fisión nuclear**– era un tipo de reacción nuclear hasta entonces desconocido. Con su descubrimiento se inició la llamada **era atómica**.

Sin embargo, el mayor interés del proceso de fisión estriba en que va acompañado de una emisión de dos o tres neutrones por cada núcleo escindido. En 1939 el físico Joliot-Curie sugirió que estos neutrones podían originar una reacción en cadena. Esta consiste en que los neutrones liberados en la fisión de un átomo chocan con otros átomos y provocan, así, nuevas fisiones. Los neutrones liberados fisionan, a su vez, otros átomos de uranio, y así sucesivamente. De este modo, una vez iniciada la reacción nuclear, esta puede sostenerse por sí misma:





10. El núcleo de uranio-235, cuando absorbe un neutrón lento –neutrón dotado de poca velocidad–, se deforma y finalmente se escinde –se fisiona– en dos núcleos, por ejemplo, bario y kriptón. Se liberan dos neutrones y mucha energía. Los neutrones liberados fisionan otros núcleos de uranio-235 y se inicia, así, una reacción en cadena.

Los dos fragmentos producidos en la fisión del uranio son núcleos atómicos más pequeños rodeados de algunos electrones, que después capturan más electrones para formar átomos neutros.

La clase de núcleos originados puede variar dentro de amplios límites, ya que la distribución de los 92 protones del núcleo de uranio inicial entre los dos fragmentos de la fisión no siempre es la misma.

Así, en la reacción nuclear de la figura 10 se obtienen bario y kriptón, pero pueden aparecer xenón, cesio, yodo, etc. Se ha descubierto que el $^{239}_{94}\text{Pu}$ también es fisionable y provoca una reacción en cadena.

Los núcleos originados son siempre isótopos radiactivos.

Una reacción en cadena, como la indicada en la figura 10, puede fisionar gran parte de los núcleos de uranio presentes al principio y producir una enorme cantidad de energía, suma de las energías originadas en cada fisión.

La energía liberada en una reacción nuclear de fisión es consecuencia de la transformación de masa en energía: en una fisión nuclear, la masa de los productos finales es menor que la masa de los productos iniciales.

La gran cantidad de energía disponible en la reacción de la fisión nuclear en cadena puede liberarse de dos maneras distintas: de **forma lenta y controlada** en un reactor nuclear, o súbitamente, instantáneamente, en una **explosión nuclear** (bomba atómica).

Bohr demostró que, aunque el uranio natural es una mezcla de tres isótopos, solo el $^{235}_{92}\text{U}$ es capaz de escindirse o fisionarse bajo la acción de neutrones, ya sean lentos o rápidos, aunque los más eficaces son los lentos.

La fisión nuclear representó para los físicos una auténtica sorpresa. Ninguna teoría física había predicho la fisión nuclear y sus descubridores no se imaginaron que se aplicaría más tarde a la fabricación de la bomba atómica.



De 1 kg de uranio-235 fisionado se obtiene una energía del orden de $6,1 \times 10^{12}$ J. Esta energía es, aproximadamente, la misma que se obtendría en la explosión de 3 000 000 kg de dinamita.

La masa equivalente a la energía liberada de $6,1 \times 10^{12}$ J es, aplicando la ecuación de Einstein, $E = mc^2$:

$$m = \frac{6,1 \times 10^{10} \text{ J}}{(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2} = 0,68 \times 10^{-3} \text{ kg} = 0,68 \text{ g}$$

Así pues, en la fisión de 1 kg de uranio-235 desaparecen 0,68 g de masa.

DOCUMENTO 2

La bomba atómica

Las investigaciones para la puesta a punto de la bomba atómica se efectuaron en Los Álamos (Nuevo México), en EEUU, e intervinieron eminentes científicos: Oppenheimer, Fermi, Bohr, Bethe, Chadwick, Allison, etc.

La primera bomba atómica tenía como núcleo fisionable el $^{239}_{94}\text{Pu}$ y se lanzó el 16 de julio de 1945, en el desierto de Alamogordo (Nuevo México), cercano a una base aérea norteamericana.

Tres semanas después, el 6 de agosto de 1945, Estados Unidos lanzó sobre la ciudad de Hiroshima (Japón) la segunda bomba atómica, la primera con finalidad militar, que ocasionó 80 000 muertos, 100 000 heridos y dejó a unas 200 000 personas sin hogar.

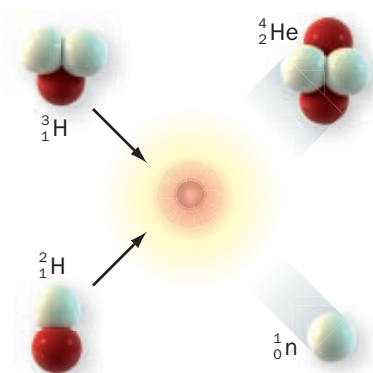


Tres días más tarde, otra bomba atómica destruyó la ciudad de Nagasaki. Esto aceleró el final de la Segunda Guerra Mundial.

Al estallar la bomba atómica, la enorme cantidad de energía desprendida en una fracción de segundo eleva la temperatura en varios millones de grados centígrados y provoca una onda expansiva que llega a varios kilómetros de distancia del centro de la explosión, produciendo la total destrucción de lo que halla a su paso. Además, como los productos de la fisión son radiactivos, hay intensas radiaciones α , β y γ , que al dispersarse sobre grandes extensiones de terreno constituyen un peligro mortal que perdura durante tiempo. Los efectos son, por tanto, devastadores.

Desde 1946 se han realizado muchas experiencias con bombas atómicas, que se han hecho estallar bajo el agua o en lugares desérticos.

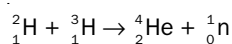
Ensayo nuclear en la Polinesia francesa.



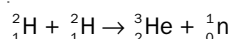
11. Fusión de un núcleo de deuterio con uno de tritio para formar un núcleo de helio-4 y un neutrón. En esta reacción nuclear se libera mucha energía.

En la **fusión nuclear** se unen núcleos de elementos ligeros para dar núcleos de mayor masa.

Por ejemplo, un núcleo de deuterio (${}^2_1\text{H}$) puede fusionarse con uno de tritio (${}^3_1\text{H}$) para formar un núcleo de ${}^4_2\text{He}$. En esta reacción nuclear se libera un neutrón (Fig. 11):



También se pueden fusionar dos núcleos de deuterio según:



Estas reacciones de fusión, llamadas también de **nucleosíntesis**, desprenden gran cantidad de energía, como consecuencia de la transformación de masa en energía. La energía desprendida es comparativamente superior a la de una reacción de fisión.

La gran dificultad para llevar a término una reacción de fusión radica en que se necesitan enormes cantidades de energía para iniciar la reacción, debido a que los núcleos tienen carga positiva y se repelen fuertemente al aproximarse. Estas repulsiones solo pueden vencerse si las partículas poseen gran energía cinética.

Así, por ejemplo, a temperatura ambiente, el isótopo ${}^2_1\text{H}$, deuterio, se presenta en forma de moléculas diatómicas. Si el gas se calienta hasta alcanzar temperaturas cercanas a 5000 °C, las moléculas se disocian –se rompen– en átomos. A mayor temperatura, del orden de 10^5 °C, núcleo y electrón se separan. Las partículas tienen entonces elevada energía cinética. El estado en el que la materia está formada por partículas con cargas libres positivas y negativas en movimiento continuo y desordenado se llama **estado de plasma**.

Pero solo a temperaturas cercanas a 10^7 °C, algunos núcleos tienen la suficiente energía cinética para vencer las fuerzas de repulsión; y, al chocar dos núcleos, pueden quedar unidos. Se origina así la fusión de estos en un solo núcleo, que tiene una masa más pequeña que la suma de la de los dos núcleos que han chocado. La masa desaparecida nos aparece en forma de energía. Reacciones nucleares de fusión se desarrollan en el interior del Sol y de las estrellas (Fig. 12).



12. El Sol es una gigantesca fábrica de fusión nuclear que transforma cada segundo 700 millones de toneladas de dihidrógeno en 695 millones de toneladas de helio. La diferencia –5 millones de toneladas– se convierte en energía a través de una compleja serie de reacciones nucleares, en las que se producen dos tipos de partículas elementales, los fotones, que se llevan el 98% de la energía liberada, y los neutrinos, que se llevan el 2% de la energía restante.



Gracias a estas reacciones de fusión nuclear, el Sol irradia una energía de 10^{26} J cada segundo y en su interior se alcanzan temperaturas alrededor de quince millones de grados centígrados.

En nuestro planeta, la temperatura necesaria para iniciar la fusión nuclear se puede obtener mediante la explosión de una bomba atómica de fisión.

La llamada **bomba de hidrógeno o bomba termonuclear** es un sistema formado por una bomba de fisión que, al estallar, aporta la energía inicial necesaria para la fusión.

Puesto que el proceso de fusión desprende cantidades de energía muchísimo mayores a las que acompañan la fisión, la temperatura se elevará todavía más y el proceso tendrá carácter explosivo. El poder destructor de la bomba de hidrógeno es muchísimo mayor que el de las bombas de fisión.

Las bombas de hidrógeno no se han utilizado con fines bélicos, solo se han hecho estallar con carácter experimental. En 1951, Estados Unidos hizo estallar la primera bomba de hidrógeno. Le siguieron la URSS, Inglaterra, Francia y otras potencias. La explosión de una bomba de hidrógeno origina una inmensa bola de fuego, que calcina todo cuanto abarca en un radio de más de 20 kilómetros.

De momento, la energía desprendida en la fusión nuclear no se ha podido controlar, al contrario de lo que ocurre dentro de los reactores nucleares para la fisión nuclear.

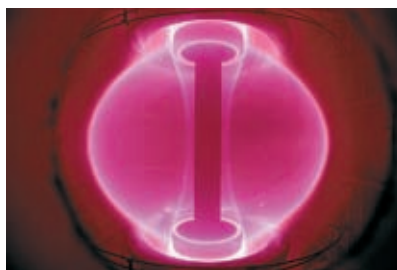
La fusión nuclear controlada es uno de los retos tecnológicos del inminente futuro, ya que presenta una serie de ventajas sobre la fisión. La primera es que la materia prima es prácticamente inagotable, ya que el deuterio puede obtenerse del agua del mar. Por otro lado, el riesgo radiactivo es mínimo, pues el producto final es helio, gas inerte no radiactivo.

Actualmente, para conseguir la fusión nuclear controlada y obtener un reactor de fusión, se está trabajando con los **tokamaks**, aparatos en los que, mediante campos magnéticos muy intensos, se confina el plasma durante un tiempo suficientemente prolongado para que se inicien las reacciones de fusión. Ya se ha iniciado el diseño de un tokamak de grandes dimensiones, el ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*). En este proyecto participan la Unión Europea, Estados Unidos, Japón y Rusia.

Dado el actual ritmo de extracción de petróleo y gas natural, los yacimientos se agotarán dentro de unos 50 o 60 años y los de carbón, dentro de unos 150 o 200 años. Tampoco son ilimitadas las reservas de uranio. Por todo esto, se cree que la fusión nuclear controlada es la energía del futuro.



13. En esta cámara de un tokamak puede confinarse plasma a altas temperaturas, lo que sirve para investigar la viabilidad de la fusión nuclear.



14. Plasma confinado en el interior de un tokamak.

Fisión nuclear controlada

El consumo creciente de energía debido al desarrollo industrial y económico de las sociedades modernas hizo pensar en la posibilidad de aprovechar las enormes cantidades de energía que pueden proporcionar las reacciones de fisión nuclear. El problema consiste en **producir, mantener y controlar** una reacción nuclear de fisión.

En 1942, Fermi realizó, por primera vez, una reacción de **fisión nuclear controlada** en el llamado reactor nuclear.

Un **reactor nuclear de fisión** consiste en un aparato en el cual se han dispuesto barras o capas de uranio (natural o uranio enriquecido, que contiene del 3 % al 5 % de uranio-235) alternado con barras (o capas) de un material que reduzca o frene la velocidad de los neutrones. Las sustancias que tienen esta propiedad se llaman **moderadores**. Se han utilizado como tales el grafito, agua pesada (D_2O), berilio, etc. Este material ha de ser tal que no sufra transmutación por efecto de los neutrones que lo atraviesan.

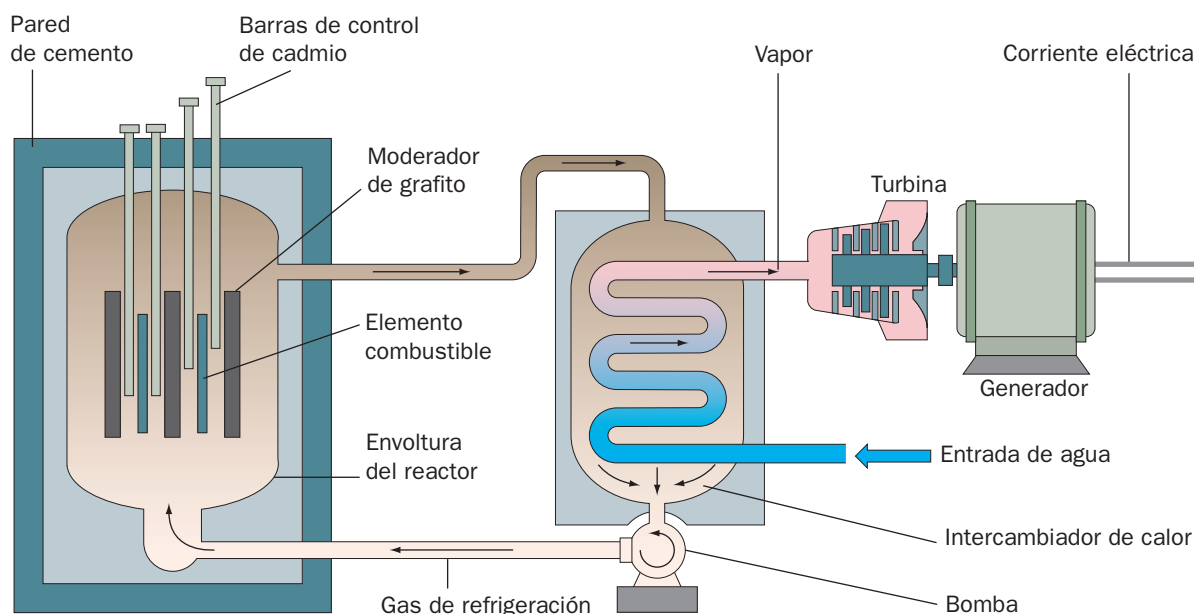
Cuando se inicia la fisión en una de las barras de uranio, los neutrones obtenidos salen de ella a gran velocidad. Al entrar en el grafito (u otro moderador) reducen su energía cinética y pasan de neutrones rápidos a neutrones lentos. Cuando estos neutrones lentos entran en otra

barra de uranio, fisionan nuevos átomos de uranio-235. De este modo, se inicia la reacción en cadena.

Dado que cada fisión libera gran cantidad de energía, es necesario que dicha energía se libere lentamente y que se mantenga siempre bajo control. Para ello, se coloca en el reactor alguna sustancia que se transmute fácilmente por acción de los neutrones y, por tanto, sea capaz de absorberlos. El cadmio es un buen absorbente de neutrones. Dentro del reactor se disponen barras de cadmio en tal cantidad que la reacción de fisión no pueda propagarse. A continuación se extraen del reactor las barras, una a una, o se vuelven a introducir, según convenga, controlando así la velocidad de fisión.

En un reactor nuclear, la energía desprendida se obtiene en forma de calor aprovechable que se transfiere hacia el exterior a través de un circuito cerrado que contiene, por ejemplo, vapor de agua o dióxido de carbono. En una central nuclear la energía desprendida se transforma en energía eléctrica.

La energía nuclear controlada tiene otras aplicaciones, como la propulsión de submarinos y barcos de guerra (ya que les permite una larga permanencia en el mar sin tener que repostar combustible), la propulsión de naves espaciales, etc.



Esquema de un reactor nuclear.

Ciencia, técnica y sociedad

Ventajas y riesgos de las centrales nucleares

Las centrales nucleares constituyen una **fuentes energética de gran potencia y bajo costo**: tienen la ventaja de producir mucha energía a partir de masas relativamente pequeñas de uranio o plutonio.

Así, por ejemplo, con un kilogramo de uranio-235 fisionado se obtiene, aproximadamente, la misma cantidad de energía que la obtenida en la combustión de 2 500 000 kg de carbón.

Actualmente, la energía nuclear aporta un 17 % de la energía eléctrica en el planeta. Francia es el país europeo con más centrales nucleares, pues tiene 59 en funcionamiento. En España funcionan nueve.

En los últimos años en Europa se ha reducido la construcción de nuevas centrales nucleares y los actuales gobiernos de algunos países, como Alemania, piensan aplicar una política de cierre de sus centrales, que desaparecerían antes del año 2025. Esto se debe, por un lado, al problema del almacenamiento de los residuos radiactivos obtenidos en la fisión y, por otro, al hecho de que el margen de seguridad parece insuficiente en algunas centrales.

La mayor catástrofe sucedida hasta la fecha en una central nuclear ocurrió el 25 de abril de 1981 en **Chernóbil** (al norte de Ucrania). La explosión y posterior incendio de un reactor nuclear produjo una gran nube radiactiva que, arrastrada por el viento hacia el norte y el oeste, depositó partículas radiactivas en extensas zonas. Las más afectadas, además de Ucrania, fueron Bielorusia, Georgia, Polonia, Suecia, Alemania, Austria y Hungría.

Las consecuencias sobre los seres vivos son escalofriantes: unos 32 000 muertos en el accidente y, según los expertos, las pérdidas humanas continuarán aumentando, porque

pueden pasar años antes de que los cánceres causados por la radiación se manifiesten. El desastre de Chernóbil repercute en todo el planeta a causa de la **contaminación radiactiva** duradera del suelo, el agua y el aire.

En octubre 1999 ocurrió otro accidente nuclear en Tokaimura (Japón), el más grave en cuanto a número de personas contaminadas desde el siniestro de Chernóbil. Los hechos de Chernóbil y de Tokaimura ponen de manifiesto la gran responsabilidad de los ingenieros que diseñan las plantas nucleares y de los que se ocupan de su perfecto mantenimiento.

Como hemos indicado, otro gran problema de las centrales nucleares es el **almacenamiento de los residuos altamente radiactivos** procedentes de la fisión. Estos yacen introducidos en bidones en el fondo de grandes piscinas o se entierran bajo tierra. Estos residuos, junto con el plutonio y el uranio procedentes del desmantelamiento de armamento nuclear, se han ido acumulando durante más de 50 años, sin que de momento se haya encontrado ningún método para su confinamiento definitivo.

Actualmente se trabaja con la idea de enterrar los residuos radiactivos en el subsuelo oceánico, ya que se han identificado amplias zonas del Atlántico y del Pacífico que han permanecido geológicamente estables durante millones de años.

Pese a las grandes ventajas que ofrece la energía nuclear, los riesgos no son en absoluto despreciables. Por eso el **uso de energías renovables** debe ser considerado como una opción seria en el ámbito del desarrollo de las sociedades actuales.



5 | La física de partículas

Desde la más remota antigüedad el ser humano se ha planteado de qué está formada la materia. Los primeros pensadores griegos buscaron un elemento primigenio (*arjé*) como constitutivo de la materia. **Empédocles** amplió el rango para afirmar que la materia se componía de cuatro elementos fundamentales: aire, agua, fuego y tierra. Posteriormente, **Demócrito** y **Leucipo** formularon una teoría atomista que resultaría la precursora de la teoría atómica de **Dalton** en el siglo XVIII.

Una vez aceptado el modelo atómico, pronto se vió, que el átomo no era la unidad indivisible de la materia. El átomo está formado por otras partículas que vinieron a llamarse **subatómicas**.

El protón y el electrón fueron las primeras partículas subatómicas halladas. Pronto se unió al grupo el neutrón.

Una vez descubierto el neutrón, en 1932, los físicos y químicos pensaron que la materia estaba constituida por tres partículas elementales: protones, neutrones y electrones. Pero, en el mismo año 1932, **Carl D. Anderson** descubrió, al estudiar los rayos cósmicos, el positrón, partícula idéntica al electrón pero de carga positiva.

Durante la segunda mitad del siglo XX los esfuerzos por determinar la totalidad del mapa subatómico se fueron multiplicando. Apoyados en una teoría (**modelo estándar de física de partículas**), que a menudo funciona por delante del campo experimental y de potentes aparatos, como los aceleradores de partículas, ha podido diseñarse una hipótesis que explica gran parte de los fenómenos subatómicos observados. Esta teoría está aún inacabada, pero contribuye a crear un esquema acerca del mundo subatómico.

Murray Gell-Man postuló la existencia de unas partículas denominadas **quarks**. Estas se combinan de tres en tres para formar los neutrones o los protones, o de dos en dos, formando otros muchos tipos de partículas, como los **piones** o los **kaones**.

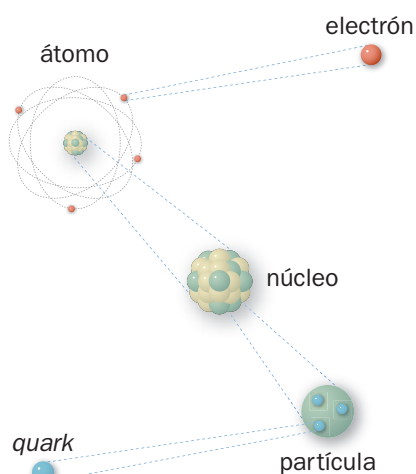
Las partículas tienen propiedades como la masa, la carga o el espín. Tenemos una imagen intuitiva de las dos primeras. El espín indica las vueltas que debe dar una partícula para que quede exactamente igual que como estaba, considerando que esta tiene forma esférica.

Las partículas pueden clasificarse en dos tipos: los **fermiones** y los **bosones**. Los fermiones son las partículas formadas por materia, mientras que los bosones son las partículas que transmiten las **interacciones**.

La diferencia entre ambos se encuentra en el espín. Los fermiones tienen espín no entero ($1/2$ o $3/2$) y los bosones tienen espín entero (0, 1 o 2). Esta diferencia es fundamental ya que, mientras que no puede haber dos fermiones juntos en el mismo estado, sí puede haber bosones juntos en un mismo estado. Es decir, los bosones no cumplen el **principio de exclusión de Pauli**.

Los fermiones se dividen en tres familias, cada una de ellas formada por un *electrón*, un *neutrino* y dos *quarks*. Los electrones de las tres familias son el **electrón**, el **muón** y el **tau** (estas dos últimas, de mayor masa que el electrón). Sin embargo, la materia que conocemos solo esta formada por

Gell-Man tomó el término *quark* de la obra del escritor irlandés James Joyce *Finnegans Wake*.



15. Constituyentes de la materia.



elementos de la primera familia, ya que las otras dos aparecen en condiciones especiales generadas en aceleradores de partículas.

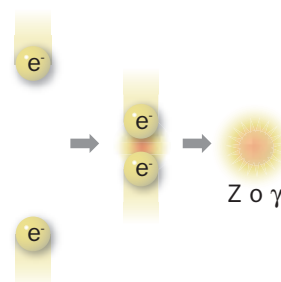
A estas 12 partículas cabría añadir sus correspondientes **antipartículas** (**positrón**, **antineutrino** y **antiquarks**). Una propiedad fundamental de los pares partícula-antipartícula es que, al chocar, se aniquilan mutuamente. La masa perdida aparece en forma de energía. También puede ocurrir el proceso inverso. En ambos casos se cumple la ecuación de Einstein:

$$E = m c^2$$

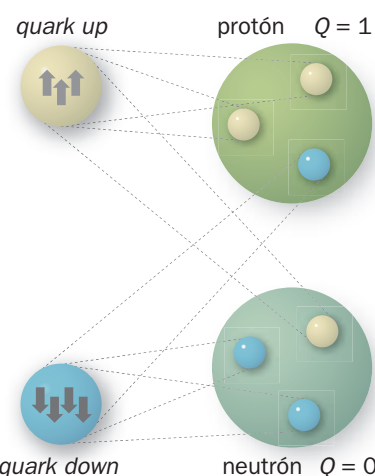
Los electrones y los neutrinos se denominan **leptones**.

Los protones y los neutrones no son partículas elementales, ya que están formados por tres *quarks*. A las partículas formadas por tres *quarks* se les llama **bariones** (protones, neutrones y otras mas inestables, denominadas **hiperones**).

Nombre	Masa (MeV)	Espín
Familia 1		
Electrón	0,51	1/2
Neutrino electrónico	0	1/2
Quark up	5	1/2
Quark down	10	1/2
Familia 2		
Muón	105,66	1/2
Neutrino muónico	0	1/2
Quark charm	1600	1/2
Quark strange	180	1/2
Familia 3		
Tau	1771	1/2
Neutrino tauónico	0	1/2
Quark top	180 000	1/2
Quark bottom	4500	1/2



16. La aniquilación de un par partícula-antipartícula siempre da lugar a energía.



17. Los protones y los neutrones se forman mediante distintas combinaciones de quarks.

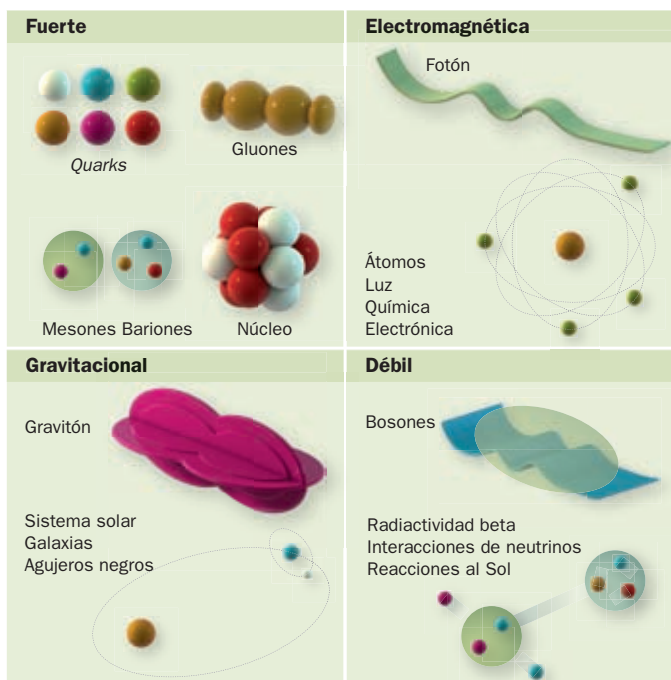


6 | Las interacciones fundamentales

Los bosones son los mediadores de fuerza o partículas portadoras de las interacciones fundamentales, puesto que los campos electromagnético, electrodébil, fuerte y, presumiblemente, el gravitatorio, están asociados a partículas de espín entero.

En física hay cuatro interacciones fundamentales:

- La **fuerza gravitatoria**, que se relaciona con la atracción entre distintas masas.
- La **fuerza electromagnética**, relacionada con la atracción o repulsión entre cargas.
- La fuerza que permite la unión entre los protones y los neutrones en el núcleo del átomo. Fue llamada la **fuerza nuclear fuerte**.
- La **fuerza nuclear débil**, que explica fenómenos como el decaimiento beta y la radiactividad.



18. Las cuatro interacciones con sus respectivos bosones.

La interacción de los bosones con los fermiones da lugar a la interacción, cuyo alcance viene dado por la masa de la partícula intercambiada. Los bosones conocidos son los **bosones W y Z** para la interacción débil, los **gluones** para la interacción fuerte, los **fotones** para la fuerza electromagnética y el **gravitón** para la fuerza gravitatoria.

El gravitón no ha sido localizado aún y su existencia se presupone teóricamente, lo que permitiría integrar la fuerza gravitatoria en la mecánica cuántica. El **bosón de Higgs**, probablemente la partícula más buscada, no ha sido observada aún en ningún experimento, pero es la que debe de explicar la existencia de masa dentro del modelo estándar. En este sentido, la avería del **colisionador de hadrones (LHC)** frustra las esperanzas de la comunidad científica, que ansía demostrar la existencia de esta partícula gracias al gran colisionador.



Las partículas compuestas por otras partículas (protones, neutrones o núcleos atómicos) pueden ser bosones o fermiones, dependiendo del espín total. El comportamiento de cada uno de ellos es radicalmente distinto en altas densidades.

Son posibles otras clasificaciones de las partículas. Por ejemplo, un **hadrón** es toda partícula subatómica que experimenta la interacción nuclear fuerte. Un **mesón** alude a un hadrón de espín entero (es decir, un bosón) y está compuesto por un par *quark-antiquark*.

Se supone que puede haber más de 200 partículas y en la actualidad se especula sobre la existencia de otro tipo de partículas, los *prequarks*, aún más básicas y más pequeñas. ¿Se llegará algún día al final de este proceso de subdivisión de la materia?

Bosones			
Nombre	Masa (MeV)	Espín	Fuerza que transmite
Fotón	0	1	Electromagnética
Bosón Z	91 188	1	Nuclear débil
Bosón W+	80 280	1	Nuclear débil
Bosón W-	80 280	1	Nuclear débil
Gluones	0	1	Nuclear débil
No localizados aún			
Bosón de Higgs	>115 000	0	Campo de Higgs
Gravitón	0	2	Gravitatoria

DOCUMENTO 3

El LHC

El LHC (*Large Hadron Collider*) es la instalación científica mayor y más importante jamás construida por el hombre y el acelerador de partículas más energético del mundo. Su construcción representa la culminación del sueño de la comunidad de científicos que han estado trabajando más de veinte años en el proyecto. Ubicado en la frontera franco-suiza, en las instalaciones del CERN, se encuentra a cien metros de profundidad y tiene 27 km de circunferencia. En este proyecto han participado más de 2000 físicos de 34 países distintos.

Las esperanzas que suscita el LHC son enormes. Los experimentos deberían revelar la existencia del bosón de Higgs (la llamada partícula de Dios) y desvelar los misterios del mundo subatómico y del origen del universo.

El LHC está programado para colisionar hadrones a velocidades próximas a las de la luz en direcciones diametralmente opuestas, produciendo altísimas energías, lo que permitiría simular condiciones inmediatamente posteriores al *big bang*. Por otra parte, la demostración de la existencia del bosón de Higgs o del gravitón permitiría la unificación de tres de las cuatro interacciones fundamentales, pretensión inconclusa de todos los físicos del siglo xx. Einstein dedicó sin éxito los últimos 20 años de su vida a este propósito.



LHC.



RESUMEN

La radiactividad es el fenómeno de la transformación (o transmutación) nuclear espontánea. Es decir, un núcleo de un átomo se transforma espontáneamente en otro, sin ayuda exterior alguna. En el fenómeno de la radiactividad, átomos de un elemento se transforman en átomos de otro elemento.

La **desintegración α** consiste en la emisión de un núcleo de helio (${}^4_2\text{He}$), formándose un elemento diferente al anterior.

La **radiación β** consiste en la emisión de un electrón causada por la transformación de un neutrón del núcleo en un protón y un electrón.

La **radiación γ** se origina en el núcleo cuando este pasa de estados de alta energía a otros de energía menor.

El **período de semidesintegración** es el tiempo que una determinada cantidad de elemento radiactivo se reduce a la mitad por haberse desintegrado la otra mitad.

Los átomos se desintegran según la expresión:

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

La **actividad de una muestra radiactiva**, $A(t)$, es el número de desintegraciones por unidad de tiempo:

$$A(t) = \frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N(t)$$

La **relación de equivalencia entre masa y energía** se encuentra mediante la expresión:

$$E = mc^2$$

La **fisión nuclear** consiste en la rotura del núcleo de un átomo para formar dos átomos más ligeros. La **fusión nuclear** es la unión de núcleos de elementos ligeros para dar núcleos de mayor masa.

Existen dos tipos de partículas: los **fermiones** y los **bosones**. Los fermiones son las partículas formadas por materia y los bosones son las partículas que transmiten las **interacciones**.

En física hay cuatro interacciones fundamentales:

- La **fuerza gravitatoria**, que se relaciona con la atracción entre distintas masas.
- La **fuerza electromagnética**, relacionada con la atracción o repulsión entre cargas.
- La fuerza que permite la unión entre los protones y los neutrones en el núcleo del átomo. Fue llamada la **fuerza nuclear fuerte**.
- La **fuerza nuclear débil**, que explica fenómenos como el decaimiento beta y la radiactividad.





ACTIVIDADES

Isótopos

- 1** El potasio de la naturaleza está formado por una mezcla de tres isótopos de números másicos 39, 40 y 41.
Indica el número de protones y neutrones que hay en el núcleo de cada isótopo y el número de electrones de la envoltura.
- 2** La masa isotópica del uranio-235 es 234,994. Calcula el valor de la energía de enlace por nucleón.
- 3** La masa isotópica del ${}^7_3\text{Li}$ es de 7,0182. Calcula el defecto de masa, la energía de enlace y la energía de enlace por nucleón para este isótopo del litio.
- 4**
 - a) ¿Qué le ocurre a un átomo de un elemento radiactivo cuando emite una partícula alfa? Razona la respuesta.
 - b) ¿Qué le ocurre a un átomo de un elemento si su núcleo captura un neutrón? Razona la respuesta.

Radiactividad

- 5** Se tiene separadamente una muestra de 0,2 mg de sulfuro de radio y otra de 0,2 mg de sulfato de radio. Indica, razonándolo, cuál de las dos muestras presenta mayor actividad radiactiva.
- 6** ¿En qué se transforma un átomo si pierde un electrón de su envoltura? Si el núcleo de un átomo emite un electrón, ¿en qué se transforma? Razona las respuestas.
- 7** ¿Cuál es la diferencia entre los términos isótopo y radioisótopo?
- 8** El tiempo o período de semidesintegración del polonio-210 es de 138 días. Si se dispone de una muestra de 8 mg de esta sustancia, ¿cuánto tiempo ha de transcurrir para que solo quede 1 mg?
- 9** Se dispone de $6,02 \times 10^{23}$ átomos del isótopo ${}^{51}\text{Cr}$, cuyo período de semidesintegración es de 27 días. ¿Cuántos átomos quedan al cabo de seis meses?
- 10** ¿Qué masa de yodo-131, cuyo período de semidesintegración ($T_{1/2}$) es de 8 días,

quedará al cabo de 20 días, si se partió de una muestra inicial que contenía 100 g de este isótopo?

- 11** El ${}^{213}_{83}\text{Bi}$ se desintegra espontáneamente por emisión β con un período de semidesintegración de 5 días. Tenemos $1,6 \times 10^{-2}$ kg de este isótopo.
 - a) ¿Qué cantidad quedará al cabo de 15 días?
 - b) ¿Cuántos protones y neutrones tiene el núcleo que resulta después de la emisión?
- 12** ¿Cuál es el período de cierto núcleo radiactivo cuya actividad disminuye en $1/8$ al cabo de un día?
- 13** Escribe e identifica los núcleos de la serie radiactiva del uranio-235 si las partículas se emiten en el siguiente orden:
Serie del uranio-235, α , β , α , β , α , α , β , α , β , α .
- 14** Completa las siguientes ecuaciones nucleares:
 - a) ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + \dots + \gamma$
 - b) ${}^{128}_{53}\text{I} \rightarrow {}^{128}_{54}\text{Xe} + \dots + \gamma$
 - c) ${}^{129}_{56}\text{Ba} \rightarrow {}^{129}_{55}\text{Cs} + \dots + \gamma$
 - d) ${}^{35}_{17}\text{Cl} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{35}_{16}\text{S} + \dots + \gamma$
 - e) ${}^{208}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{204}_{82}\text{Pb} + \dots + \gamma$
 - f) $\dots + {}^{222}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{226}_{88}\text{Ra} + \dots + \gamma$
- 15** Escribe las ecuaciones nucleares correspondientes a las siguientes observaciones, todas ellas acompañadas de emisión de radiación gamma.
 - a) El ${}^{227}_{89}\text{Ac}$ se desintegra dando ${}^{227}_{90}\text{Th}$.
 - b) El ${}^{21}_{11}\text{Na}$ es un isótopo radiactivo artificial que emite positrones.
 - c) Al bombardear con neutrones átomos de un isótopo se obtienen átomos de ${}^{16}_7\text{N}$ y partículas α .
 - d) El ${}^{197}_{78}\text{Pt}$ es un isótopo radiactivo artificial que se desintegra dando ${}^{197}_{79}\text{Au}$.
 - e) Al bombardear sodio-23 con deuterones, ${}^2_1\text{H}$, se emiten partículas beta.
 - f) Al bombardear el ${}^{238}_{92}\text{U}$ con partículas alfa, se obtiene otro elemento y además se emite un protón.



DIFICULTAD: ■ SENCILLA ■ MEDIA □ ALTA

- 16** Un átomo de ${}^{232}_{90}\text{Th}$ emite una partícula alfa; el nuevo átomo formado emite una partícula beta. Indica el número atómico y el número de masa de cada uno de los átomos obtenidos a partir del ${}^{232}_{90}\text{Th}$.

Fisión y fusión nuclear

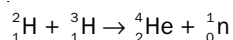
- 17** Completa las siguientes reacciones de fisión nuclear:

- a) ${}^{235}_{92}\text{U} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{101}\text{Mo} + {}^{132}\text{Sn} + \dots\dots$
 b) ${}^{239}_{94}\text{Pu} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{100}\text{Tc} + \dots\dots + 4 {}^1_0\text{n}$
 c) ${}^{239}_{94}\text{Pu} + {}^1_0\text{n} \rightarrow \dots\dots + {}^{133}_{51}\text{In} + 3 {}^1_0\text{n}$

- 18** Suponiendo que la pérdida de masa al estallar una bomba de fisión de plutonio es de alrededor de un 0,05%, calcula:

- a) La energía desprendida al estallar una bomba que contiene 100 kg de plutonio fisionable.
 b) La masa de carbón, cuyo poder calorífico fuera de 32 kJ/kg, que habría que quemar para obtener la misma energía.

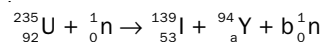
- 19** Dada la siguiente reacción de fusión:



Calcula la energía liberada—expresada en MeV— en la formación de 1 núcleo de ${}^4_2\text{He}$ y la liberada—expresada en MJ— en la formación de 1 g de ${}^4_2\text{He}$.

Datos: masas isotópicas: ${}^4_2\text{He} = 4,00388$; ${}^2_1\text{H} = 2,01474$; ${}^3_1\text{H} = 3,01700$; neutrón = 1,008665.

- 20** Una reacción de fisión del U-235 puede ser:



- a) Determina el valor de a y el de b .
 b) Calcula la energía liberada en la fisión de 1 kg de uranio-235.

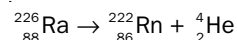
Datos: masas isotópicas: ${}^{235}\text{U} = 235,044$

${}^{139}\text{I} = 138,905$

${}^{94}\text{Y} = 93,9060$

Masa de un neutrón = 1,00867.

- 21** Dada la siguiente reacción nuclear:

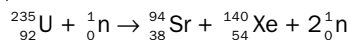


Calcula, en MeV, la energía liberada en la desintegración de un núcleo de radio-226.

Datos: masas isotópicas: ${}^{226}\text{Ra} = 226,025$

${}^{222}\text{Rn} = 222,018$ ${}^4_2\text{He} = 4,00388$

- 22** Un submarino nuclear funciona gracias a la energía basada en la fisión:



Calcula la masa de uranio-235 consumida en 10 días si la potencia media del reactor del submarino es de 25 MW.

Datos: masas isotópicas: ${}^{235}\text{U} = 235,044$

${}^{94}\text{Sr} = 93,9154$

${}^{140}\text{Xe} = 139,925$

masa de un neutrón = 1,00867