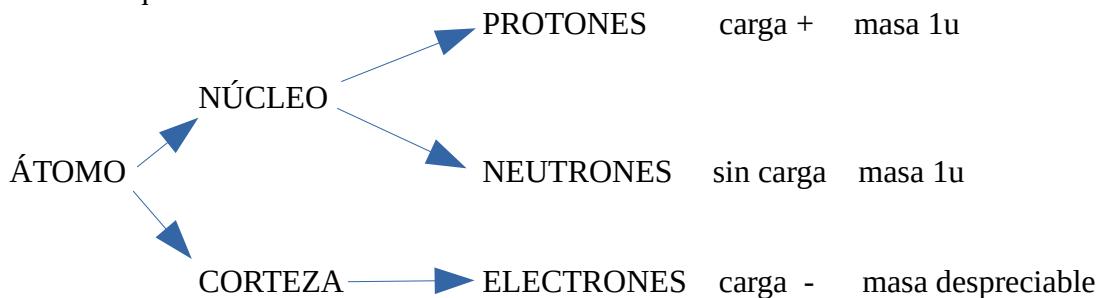


## TEMA 9. FÍSICA NUCLEAR Y PARTÍCULAS ATÓMICAS

### 1. EL NÚCLEO ATÓMICO

Sabemos que:



La evidencia experimental de la existencia del núcleo tiene lugar en 1896 con la observación de Becquerel de la radioactividad, que consiste en la emisión de partículas por parte de los núcleos de ciertos átomos (ya que experimentalmente se comprueba que no depende de factores externos a los que se pueda someter la sustancia en el laboratorio, tales como variaciones de temperatura, presión etc., lo que hace pensar que tiene lugar en las partes más internas de los átomos). Al número de protones de un átomo se le llama **número atómico (Z)** y caracteriza el elemento, de modo que si dos átomos tienen el mismo número atómico pertenecen al mismo elemento.

Al número de nucleones (denominación común a protones y neutrones por encontrarse ambos en el núcleo) se le llama **número másico (A)**. Estos números se indican en torno al símbolo del elemento de la siguiente forma:



Dos átomos que tengan igual número atómico (pertenecen por tanto al mismo elemento) y diferente número de masa se dice que son átomos **isótopos**. Los átomos isótopos de un mismo elemento tienen las mismas propiedades químicas, pero distintas propiedades nucleares. Todos los núcleos que tengan los mismos valores de Z y A constituyen una especie nuclear particular, llamada **núclido o nucleido**. Los isótopos radioactivos de cualquier elemento se llaman **radioisótopos**.

El radio, R, del núcleo de un átomo puede calcularse con la expresión  $R = 1,2 \cdot 10^{-15} \cdot A^{1/3}$ , en metros. Se trata de una fórmula empírica donde A es el número másico, resultando que:

- El volumen de los núcleos es directamente proporcional a su masa.
- La densidad es la misma para todos los núcleos con un valor muy grande, de cara de  $10^{17} \text{ kg m}^{-3}$ . Esto supone una densidad de  $10^{14}$  veces mayor que la de cualquier cuerpo, lo que pone en evidencia que la materia es prácticamente espacio vacío , resultando que el tamaño del núcleo es unas 10000 veces más pequeño que el tamaño del átomo al que pertenece.

Para medir la masa de los átomos se emplea la llamada **unidad de masa atómica (u)** que equivale a la doceava parte de la masa del *isótopo* de carbono de número másico 12.

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} \text{ 1 átomo} \cdot \frac{12 \text{ g}}{6,023 \cdot 10^{23} \text{ átomos}} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ g} \cdot \frac{1 \text{ kg}}{10^3 \text{ g}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$$

## 2. DEFECTO DE MASA NUCLEAR

Si pensamos que las fuerzas que hay entre los nucleones de un átomo son solamente de naturaleza eléctrica y gravitatoria, no se puede explicar que los núcleos sean estables (la fuerza eléctrica de repulsión entre los protones es mucho mayor que la fuerza gravitatoria de atracción entre protones y neutrones). Hay que pensar en otras fuerzas entre los nucleones de intensidad superior a las mencionadas: son las llamadas **fuerzas nucleares de interacción fuerte**, que tienen lugar entre protón-protón, neutrón-neutrón y protón-neutrón. Esta interacción es la más intensa de todas, pero de muy corto alcance:  $10^{-15}$  m, aproximadamente, siendo despreciable a distancias mayores. Podría pensarse que la masa  $M$  de un núcleo se obtiene sumando  $Z$  veces la masa del protón y  $N$  veces la masa del neutrón. Sin embargo, la masa del núcleo de un átomo es siempre inferior a la suma de las masas de los nucleones que lo constituyen. Esta diferencia de masa es la que se conoce como **defecto de masa nuclear**, pudiendo calcularse con la expresión:

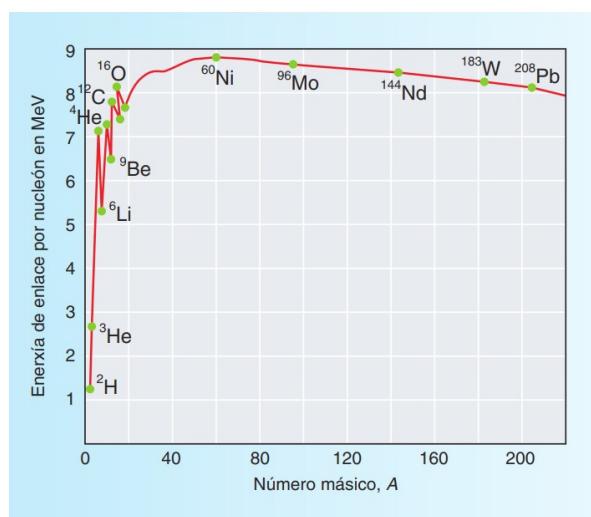
$$\Delta m = Z(m_p + m_e) + (A-Z)m_n - M_{\text{átomo}} = Zm_p + (A-Z)m_n - M_{\text{núcleo}}$$

siendo  $Z$  el número atómico y  $A$  el número másico.

Para ver el significado de este defecto de masa recordemos la equivalencia entre masa y energía, según la fórmula de Einstein (1905):

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

donde  $c = 3 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup> es la velocidad de la luz en el vacío. Si  $\Delta m$  representa la variación de masa del núcleo de un átomo, a producto  $\Delta m \cdot c^2$  le corresponde la energía liberada en la formación de ese núcleo a partir de sus constituyentes y se denomina **energía de enlace**. Representa la energía mínima que hay que suministrar a un núcleo para descomponerlo en sus nucleones. Al cociente entre la energía de enlace de un núcleo y el número de nucleones que posee es la **energía de enlace por nucleón**. Representa la energía necesaria para extraer un nucleón del núcleo e indica su grado de estabilidad: cuanto mayor sea la energía de enlace por nucleón mayor estabilidad.



La representación de la energía de enlace por nucleón en función del número de masa nos indica que la energía aumenta rápidamente en la zona de los elementos más ligeros (para  $A$  desde 1 hasta 20), a continuación sigue aumentando más lentamente hasta alcanzar el valor máximo alrededor de  $A = 56$ . Y, por último, para valores mayores de  $A$ , la energía por nucleón disminuye lentamente. Vemos que los núcleos más pesados (caso de U, Pu, ...) cuando se dividen en núcleos más ligeros –fisión– (Kr, Ba, ...) liberarán energía en el proceso. De igual manera, la unión de núcleos ligeritos (H, ...) para formar otros más pesados (He, ...) – fusión – también va acompañada de liberación de energía.

**EJEMPLO:** Calcula el defecto de masa y la energía de enlace nuclear del helio. Datos:

$${}^4_2\text{He} = 4,002603, m_e = 5,486 \cdot 10^{-4} \text{ u}, m_p = 1,007276 \text{ u}, m_n = 1,008665 \text{ u}, 1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}, c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s.}$$

Solución: Calculamos primeramente la masa del núcleo de helio restándole a la masa del átomo la masa de los electrones que posee:

$$4,002603 - 2 \cdot 5,486 \cdot 10^{-4} = 4,001506 \text{ u}$$

Ahora obtenemos la masa de dos protones y dos neutrones, que son los nucleones que posee el helio:

$$2 \cdot 1,007276 + 2 \cdot 1,008665 = 4,031882 \text{ u}$$

El defecto de masa nuclear es:

$$4,031882 - 4,001506 = 0,030376 \text{ u},$$

correspondiéndole la energía de enlace nuclear:

$$0,030376 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 4,5382 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

**EJEMPLO:** Calcula el defecto de masa nuclear, la energía de enlace nuclear expresada en julios y en eV y la energía de enlace por nucleón del  ${}^{55}_{25}\text{Mn}$ .

Datos: Masa atómica relativa del  ${}^{55}_{25}\text{Mn} = 54,93800$ ,  $m_e = 0,0005486 \text{ u}$ ;  $m_p = 1,007276 \text{ u}$ ,  $m_n = 1,008665 \text{ u}$ ;  $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ; carga  $e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

Solución: El defecto de masa se puede conocer calculando primeramente la masa del núcleo de magnesio y restándole después la masa de los nucleones que lo forman.

El  ${}^{55}\text{Mn}$  tiene 30 neutrones y 25 electrones y protones. Si a la masa atómica del magnesio le restamos la masa de 25 electrones, obtenemos la masa del núcleo:

$$54,93800 - 25 \cdot 0,0005486 = 54,92429 \text{ u}$$

La masa de 25 protones y 30 neutrones es:

$$25 \cdot 1,007276 + 30 \cdot 1,008665 = 55,44185 \text{ u}$$

El defecto de masa es:  $55,44185 - 54,92429 = 0,51756 \text{ u}$

La energía de enlace nuclear es:

$$E = m \cdot c^2 = 0,51756 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 7,7322 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

El eV es la energía que adquiere un electrón cuando se somete a la diferencia de potencial de 1 voltio ( $W = Q \cdot V = e \cdot V$ ). Si relacionamos la carga del electrón con la unidad de carga en el SI, tendremos expresados los julios (J) en unidades de eV:

$$E = 7,7322 \cdot 10^{-11} \text{ C V} = 7,7322 \cdot 10^{-11} \cdot \frac{1}{1,602 \cdot 10^{-19}} \text{ eV} = 4,8266 \cdot 10^8 \text{ eV}$$

La energía de enlace por nucleón será la energía de enlace de 1 núcleo dividida por el número de nucleones (25 protones + 30 neutrones):

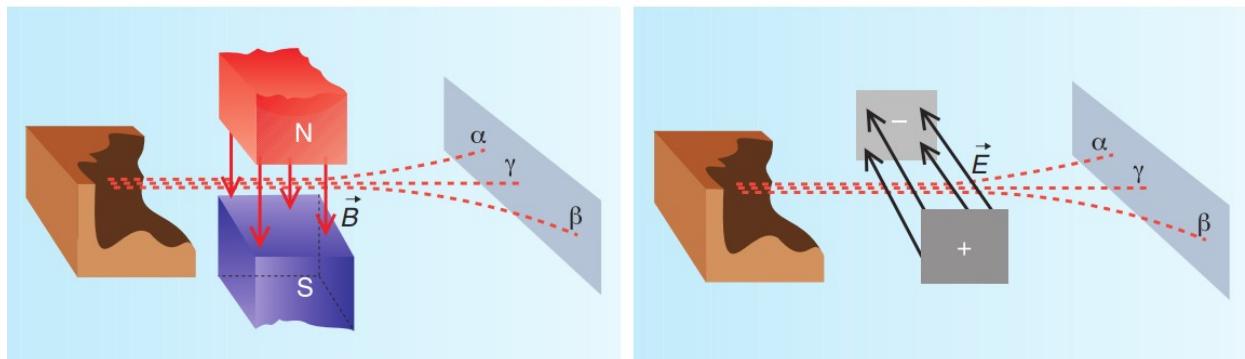
$$\frac{4,8266 \cdot 10^8}{55} = 8,776 \cdot 10^6 \frac{\text{eV}}{\text{nucleón}}$$

### 3. DESINTEGRACIONES $\alpha$ , $\beta$ y $\gamma$

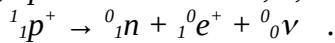
Se entiende por desintegración radioactiva, o radioactividad natural, el fenómeno consistente en la emisión espontánea de partículas o fotones por parte de algunas substancias. Fue Becquerel, en el año 1896, quien observó por primera vez este fenómeno al darse cuenta de que ciertas sales de uranio ennegrecían –impresionaban– las placas fotográficas (aún que estas estuviesen en la total oscuridad). Al principio se pensaba que el uranio era la única sustancia radioactiva, pero dos años más tarde, 1898, el matrimonio Curie descubrió un nuevo elemento radioactivo: el polonio. En ese mismo año encuentran también el radio. En 1904 ya se conocían una veintena de elementos radioactivos, gracias fundamentalmente a Rutherford y Soddy.

Cuando las radiaciones emitidas por una sustancia radioactiva se hacen pasar a través de un campo magnético, se observa que:

- Parte se desvía ligeramente en un sentido.
- Parte se desvía más fuertemente en sentido contrario.
- Y parte no sufre desviación ninguna. Rutherford distinguió estos tres componentes con los nombres de rayos alfa ( $\alpha$ ), rayos beta ( $\beta^-$ ) y rayos gamma ( $\gamma$ ), respectivamente.



Estas mismas desviaciones se observan si cambiamos el campo magnético por un campo eléctrico,  $E$ . Como los rayos  $\beta^-$  se desvían en el mismo sentido que los rayos catódicos, Becquerel pensó que era como si de electrones se tratara (año 1900). Como en el núcleo no hay electrones, se supone que todo sucede como si un neutrón se desintegrase en: un protón, un electrón (que es la radiación  $\beta^-$  emitida) y un antineutrino,  $\nu$  (*Esta nueva partícula, de masa nula en reposo y sin carga, se justifica por la necesidad de que se conserve la cantidad de movimiento y la energía. En el proceso de desintegración protónica,  $p^+$ , aparece un neutrón,  $n$ , un positrón,  $e^+$ , y un neutrino,  $\nu$ :*



*Los núcleos que emiten partículas  $e^+$  (también simbolizadas por  $\beta^+$ ) son ricos en protones y no existen en la naturaleza pero, a veces, aparecen en los procesos radioactivos artificiales).*

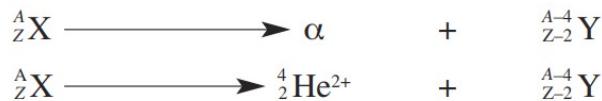
Como los rayos  $\alpha$  se desvían en sentido opuesto a los rayos  $\beta^-$  y sólo ligeramente, hacía pensar que tenían carga positiva y gran masa. Rutherford, en el año 1903, supone que se trataba de núcleos de helio: partículas con cuatro unidades de número de masa y dos unidades de número atómico. En el año 1909 confirma experimentalmente esta suposición.

Los rayos  $\gamma$  fueron descubiertos por Paul Villard en el año 1900. Como no resultaban desviados por campos eléctricos ni magnéticos, se decidió que se trataba de una radiación electromagnética, de la misma naturaleza que la luz o los RX. Se emite cuando un núcleo que se encuentra en un estado excitado, que ocurre habitualmente tras producirse una desintegración radioactiva  $\alpha$  o  $\beta$ , pasa a otro de menor energía.

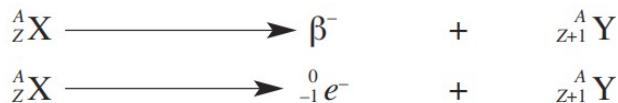
Dado que los rayos  $\alpha$  y  $\beta$  son en realidad partículas, hoy en día se sustituye el término de rayo por el de partícula (partículas  $\alpha$  y partículas  $\beta$ , respectivamente) y se sigue utilizando el de rayo (o radiación)  $\gamma$ .

Dadas las características de las partículas  $\alpha$  y  $\beta^-$  y la de los rayos  $\gamma$ , sucede que:

- Cuando un núcleo **emite una partícula  $\alpha$**  aparece un nuevo núcleo con dos unidades menos de número atómico y cuatro de número de masa, dando lugar a la aparición de un elemento diferente.

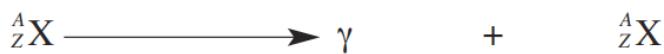


- Cuando un núcleo **emite una partícula  $\beta^-$**  aparece un nuevo núcleo de una unidad más de número atómico y de igual número mísico.



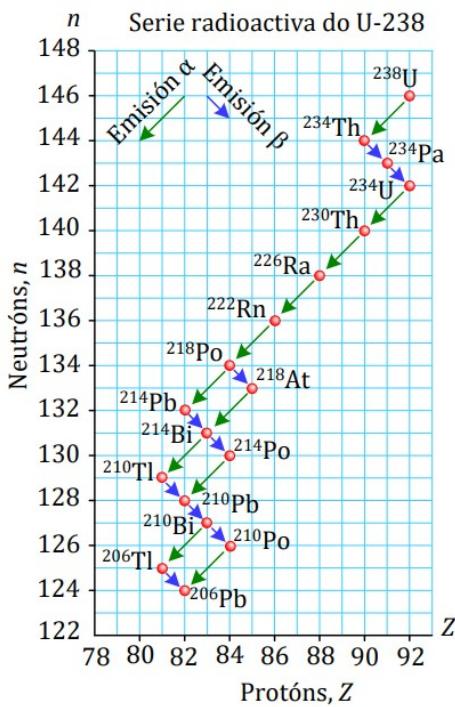
(Piensa que  $n \rightarrow p + e^- + \text{antineutrino}$ , siendo  $e^-$  la partícula  $\beta^-$  emitida, apareciendo un protón más en el núcleo).

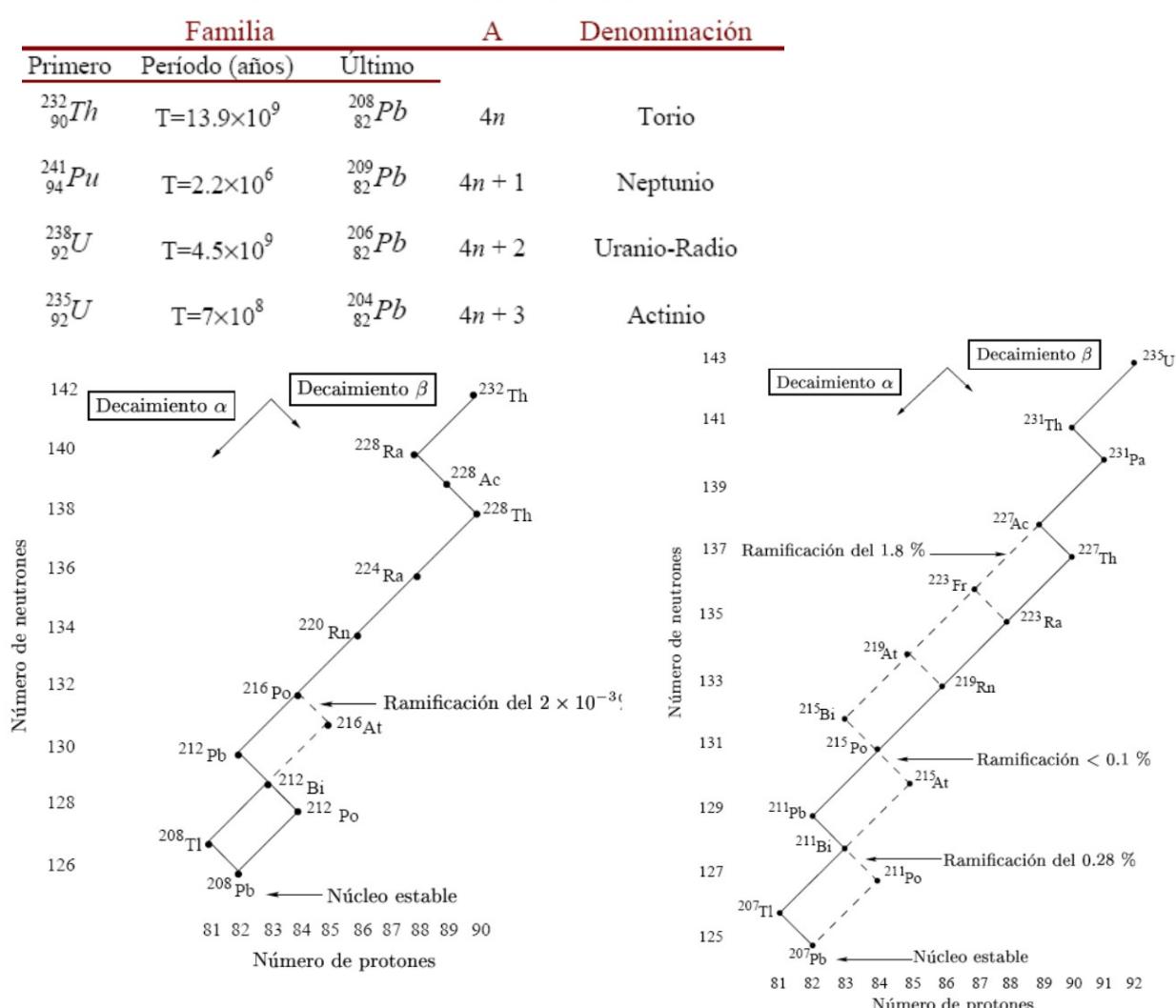
- Cuando un átomo emite un rayo  $\gamma$ , diminuye su contenido energético pero no varía su número atómico ni de masa.



Estos tres enunciados constituyen las leyes del desplazamiento radioactivo o **leyes de Soddy y Fajans**.

Siguiendo estas reglas, los núclidos radioactivos se transforman en nuevos núclidos. Con frecuencia ocurre que los núclidos obtenidos son, a su vez, radioactivos, desintegrándose a continuación hasta que se llega a un núclido estable. El conjunto de núclidos radioactivos que, derivando del mismo núclido inicial (progenitor) y por desintegración en cadena terminan en el mismo núclido estable, constituyen lo que se llama una serie radioactiva.





#### 4. REACCIONES NUCLEARES: FISIÓN Y FUSIÓN

Se entiende por reacción nuclear cualquier proceso por el que un núcleo cambia su composición, bien por ganancia-pérdida de nucleones o por conversión neutrón-protón. Por extensión también se consideran reacciones nucleares los procesos en los que un núcleo gana o pierde energía sin alterar su composición. La primera reacción nuclear producida artificialmente tuvo lugar en el año 1919 cuando Rutherford bombardeó nitrógeno con partículas  $\alpha$ , teniendo lugar la siguiente reacción:



que en notación simplificada es:



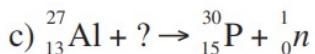
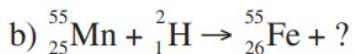
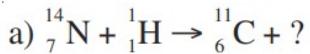
donde **N** es el núcleo inicial,  **$\alpha$**  la partícula incidente, **p** la partícula emitida y **O** el núcleo final. (Recuerda que en las reacciones nucleares la suma de los superíndices (números de masa) y subíndices (números atómicos) es la misma a ambos lados de la ecuación. Esto significa que se conserva la carga y el número total de nucleones; no se conserva la masa manifestándose su diferencia en forma de energía)

Dentro de las reacciones nucleares podemos distinguir las de fisión y fusión.

**La fisión nuclear** consiste en la división de un núcleo pesado en dos fragmentos (núcleos) de masa intermedia cuando se bombardea con una partícula pequeña (en general, un neutrón). Tres ejemplos de tales reacciones son:



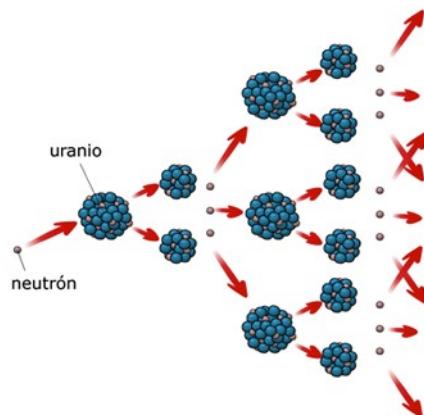
**EJERCICIO:** Completa las siguientes reacciones nucleares



(En la fisión del uranio-235 se pueden generar hasta un ciento de núcleos atómicos distintos). En la reacción de fisión se libera gran cantidad de energía por conversión de masa en energía, según la ecuación de Einstein:  $E = m \cdot c^2$ .

También aparecen nuevos neutrones capaces de continuar en cadena la reacción iniciada. Si esta reacción se controla tenemos el fundamento de los reactores nucleares, donde se produce gran cantidad de energía en forma de calor, que posteriormente se transforma en energía eléctrica en las centrales nucleares. Si la reacción discurre de forma incontrolada, se trata de una bomba atómica.

El uranio más susceptible de experimentar la fisión es el U-235, un isótopo poco abundante en la naturaleza, por lo que hay que concentrarlo, obteniendo lo que se conoce como uranio enriquecido. (El uranio-235 representa un 0,7% en una muestra de uranio natural, en la que el uranio-238 es el isótopo más abundante: 99,3% del total)



**Las reacciones de fusión** consisten en la unión

de dos núcleos ligeros para dar otro más pesado, siendo la masa de los productos de la reacción menor que la de los reactivos, desprendiéndose durante el proceso una enorme cantidad de energía. Un ejemplo es:



La fusión tiene la ventaja de ser más energética que la fisión y de carecer de residuos radioactivos. Sin embargo, no hay centrales nucleares de fusión en funcionamiento de manera análoga a las existentes de fisión. La razón está en que para que se produzca la fusión es necesario que los núcleos choquen entre sí a gran velocidad para vencer la repulsión coulombiana entre los núcleos, lo que significa una gran energía, que se consigue cuando la temperatura el gas que los contiene es superior a 100 millones de grados Celsius (apareciendo el estado del plasma, es decir: núcleos y electrones libres). Tales temperaturas se da en el interior de las estrellas y las reacciones de fusión que en ellas tienen lugar son el origen de la energía que desprenden. En la actualidad existen reactores experimentales de fusión que no son rentables al consumir más energía de la que producen. Una aplicación bélica de la energía de fusión se hizo en los años cincuenta utilizando una bomba de fisión (atómica) para conseguir la energía inicial necesaria. El resultado es la bomba H o bomba de hidrógeno.

(Puede decirse que el estado de plasma es como se fuese un nuevo estado de la materia, distinto de los ya conocidos de sólido, líquido y gaseoso. Para entender en qué consiste este nuevo estado, si tomamos como ejemplo la molécula de hidrógeno. La temperatura ambiente es un gas, formado por moléculas diatómicas. Si se eleva la temperatura de este gas hasta varios miles de grados Celsius, las moléculas se rompen en átomos, pero si la temperatura es del orden del millón de grados, el electrón abandona el átomo, quedando separados los núcleos y los electrones, moviéndose todos ellos a enormes velocidades, apareciendo el estado de plasma. Como la temperatura es tan alta, aparece la dificultad de construir un recinto que, conteniendo el plasma, no se funda)

**EJERCICIO:** En el Sol tiene lugar la siguiente reacción de fusión:  ${}^1{}_1\text{H} \rightarrow {}^4{}_2\text{He} + 2 {}^0{}_1\text{e} + 2 \nu + E$ , donde  ${}^0{}_1\text{e}$  es un positrón. Si las masas atómicas de  ${}^1\text{H}$ ,  ${}^4\text{He}$  y  ${}^0{}_1\text{e}$  son, respectivamente: 1,007825, 4,002604 y 0,000549 u, estando incluidas las masas de los electrones en los dos primeros valores; calcula la energía liberada al consumirse 2 kg de hidrógeno.

Datos: 1 u =  $1,66 \cdot 10^{-27}$  kg;  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  partículas/mol,  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ .

A la temperatura a la que tiene lugar la reacción de fusión (cientos de millones de grados Celsius) los electrones tienen abandonados los átomos a los que pertenecían, siendo solamente los núcleos de los átomos los que experimentan la reacción de fusión. Para el caso del problema, a partir de 4 núcleos de hidrógeno se forma un núcleo de helio, desprendiéndose 2 positrones, 2 neutrinos y energía.

$$\begin{aligned}\Delta m &= (4 m_{^1\text{H}} - 4 m_{e^-}) - [(m_{^4\text{He}} - 2 m_{e^-}) + (2 m_{e^-})] = 4 m_{^1\text{H}} - 4 m_{e^-} - m_{^4\text{He}} \\ \Delta m &= 4 \cdot 1,007825 - 4 \cdot 0,000549 - 4,002604 = 0,026500 \text{ u} \\ E &= m c^2 = 0,026500 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 3,9591 \cdot 10^{-12} \text{ J}\end{aligned}$$

Esta energía es liberada en la fusión de 4 átomos de hidrógeno, que equivalen a:

$4 \cdot 1,007825 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} = 6,69196 \cdot 10^{-27}$  kg de hidrógeno. Por lo tanto, la energía liberada en el consumo de 2 kg será:

$$\frac{3,9591 \cdot 10^{-12} \cdot 2}{6,69196 \cdot 10^{-27}} = 1,1832 \cdot 10^{15} \text{ J}$$

Si queremos usar el dato del número de Avogadro haríamos:

$$\begin{aligned}2 \text{ kg} &= 2000 \text{ g} \rightarrow \frac{2000}{1,007825} \text{ mol} \rightarrow 2000 \frac{\text{mol}}{1,007825} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \frac{\text{átomos}}{\text{mol}} = \\ &= 1,195 \cdot 10^{27} \text{ átomos de H en 2 kg}\end{aligned}$$

Ahora relacionamos la energía liberada por 4 átomos de hidrógeno con el número de átomos que hay en 2 kg que se consumen de hidrógeno:

$$\frac{1,195 \cdot 10^{27} \cdot 3,9591 \cdot 10^{-12}}{4} = 1,1828 \cdot 10^{15} \text{ J}$$

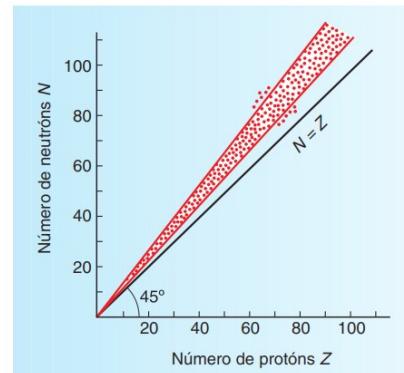
## 5. ESTABILIDAD NUCLEAR

Hoy en día se conocen más de mil núcleos diferentes de los que la cuarta parte son estables. ¿Qué regularidad tienen los núcleos de los átomos estables? Se observa que:

- Núcleos de número atómico par son mucho más numerosos que los de número atómico impar.
- Núcleos de número másico par son más abundantes que los de número másico impar.
- Los núcleos estables tienen igual o mayor número de neutrones que de protones (se exceptuamos  $^1_1\text{H}$  y  $^3_2\text{He}$ ) siendo los más abundantes aquellos para los que esta relación es menor de 1,2, no encontrándose núcleos estables para valores mayores de 1,6.

(Los núcleos de número atómico pequeño poseen aproximadamente el mismo número de protones que de neutrones, mientras que a medida que va aumentando el número atómico, el número de neutrones es mayor que el de protones para disminuir la repulsión eléctrica entre los protones. Cuando la relación neutrones/protones es demasiado grande, el núcleo es inestable y se estabiliza convirtiendo un neutrón en un protón y un electrón (y un antineutrino).)

En el gráfico se representa la banda de estabilidad de los núcleos. Un núcleo fuera da banda de estabilidad del gráfico tiende a convertirse en estable, desintegrándose espontáneamente en otro núcleo más próximo a esta banda. Si el núcleo está a la izquierda de la región de estabilidad es porque posee un exceso de neutrones (o un defecto de protones). Por lo contrario, si está a la derecha es porque tiene un exceso de protones (o una deficiencia de neutrones) En resumen, vemos que la estabilidad de un átomo depende de la relación protón-neutrón.



## 6. DECAIMIENTO EXPONENCIAL Y VIDA MEDIA

La radioactividad consiste en la emisión espontánea de partículas por parte de los núcleos de ciertos átomos. Es un proceso aleatorio y no podemos predecir cuando un determinado átomo se desintegrará y emitirá radiaciones, pero podemos aplicar las leyes de la estadística a un gran número de átomos radioactivos. El número de átomos que se desintegran ( $dN$ ) es directamente proporcional al número de átomos presentes ( $N$ ) y al tiempo ( $dt$ ).

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt$$

El signo menos indica que a medida que pasa el tiempo el número de átomos sin desintegrar es cada vez menor ( $N_f < N_0$ ). La **constante de desintegración o constante radioactiva,  $\lambda$** , depende del tipo de sustancia. Integrando se obtiene la ley de desintegración radioactiva:

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = \int_0^t -\lambda \cdot dt \rightarrow \ln \left[ \frac{N}{N_0} \right] = -\lambda t \rightarrow N = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

siendo  $N_0$  el número de

átomos sin desintegrar en el instante inicial y  $N$  el número que hay en el instante  $t$ . Vemos que este número disminuye exponencialmente.

$$|dN/dt| = -dN/dt = \lambda N$$

es la llamada **actividad, A, o velocidad de desintegración** de la sustancia y representa el número de desintegraciones que ocurren en cada unidad de tiempo.

En el SI su unidad es el **becquerel (Bq)** que es la actividad de una sustancia que estadísticamente produce una desintegración por segundo. Anteriormente al Bq se definió el curio, Ci, que es la actividad de un gramo de radio (produce  $3,7 \cdot 10^{10}$  desintegraciones por segundo). Si multiplicamos por la constante radioactiva  $\lambda$  los dos miembros de la expresión de la desintegración radioactiva resulta:

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

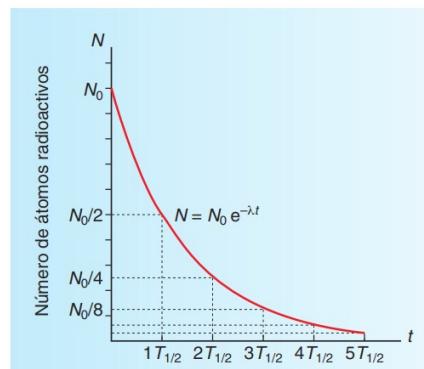
Con el concepto de actividad, esta igualdad la podemos escribir como:  $A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$  viendo que la actividad decrece exponencialmente con el tiempo.

Se define **el período de semidesintegración,  $T_{1/2}$** , como el tiempo necesario para que una sustancia radioactiva se reduzca a la mitad. Es decir, para  $t = T_{1/2} \Rightarrow N = N_0/2$  y, en consecuencia:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}}$$

Tomando logaritmos neperianos:

$$\ln \frac{1}{2} = -\lambda \cdot T_{1/2} \rightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$



El período de semidesintegración de una sustancia radioactiva es siempre el mismo.

**EJERCICIO:** Disponemos de 64 g de  $^{32}\text{P}$  radioactivo con una constante de desintegración de  $5,5 \cdot 10^7 \text{s}^{-1}$ . Calcula las desintegraciones que se producen en: a) 29,2 días e b) 1 s. c) calcula el período de semidesintegración y, para el caso a), los gramos de sustancia desintegrada, comparando este resultado con el que se obtiene a partir del concepto de período de semidesintegración. Dato:  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  partículas/mol.

El número de desintegraciones en un tiempo se obtiene restando al número de átomos iniciales el número de átomos que quedan al transcurrir ese tiempo:  $-\Delta N = N_0 - N_f = N_0 - N_0 \cdot e^{-\lambda t} = N_0 \cdot (1 - e^{-\lambda t})$ .

a) calculamos los átomos iniciales:  $N_0 = 64 \text{g} \times 1 \text{mol} / 32 \text{g} \times 6,022 \cdot 10^{23} \text{átomos/mol} = 1,204 \cdot 10^{24} \text{átomos}$ .

El número de desintegraciones que se producen en 29,2 días:

$$-\Delta N = 1,204 \cdot 10^{24} \left(1 - e^{-5,5 \cdot 10^7 \times 29,2 \times 24 \times 3600}\right) = 9,03 \cdot 10^{23} \text{desintegraciones}$$

b) las desintegraciones en 1 segundo

$$-\Delta N = 1,204 \cdot 10^{24} \left(1 - e^{-5,5 \cdot 10^7 \times 1}\right) = 6,62 \cdot 10^{17} \text{desintegraciones}$$

$$c) T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = \ln 2 / 5,5 \cdot 10^7 = 1,26 \cdot 10^6 \text{s} = 14,6 \text{días}$$

$$d) m = 9,03 \cdot 10^{23} \text{átomos} \times 1 \text{mol} / 6,022 \cdot 10^{23} \text{átomos} \times 32 \text{g/mol} = 48,0 \text{g}$$

En un tiempo  $T_{1/2} = 14,6$  días se desintegra la mitad de la muestra. Como el tiempo de  $t = 29,2$  días es dos veces el período de semidesintegración ( $t/T_{1/2} = 29,2/14,6 = 2$ ) la cantidad de sustancia que se desintegra es:

$$N_0/2 + \frac{1}{2}N_0/2 = 64/2 + 32/2 = 48 \text{g}$$

El período de semidesintegración no debe de confundirse con la **vida media,  $\tau$** , que es el tiempo de vida medio de todos los átomos presentes. Se obtiene sumando la vida de todos los átomos y dividiendo por su número. Para hallar el tiempo total de vida de la muestra, consideramos que si en  $t = 0$  hay  $N_0$  núcleos y en  $t = t$  ha  $N$  núcleos; los núcleos desintegrados en  $t$  segundos son

$N - N_0 = \Delta N \rightarrow dN$  (cuando las variaciones son muy pequeñas). Cada uno de estos núcleos desintegrados vivió  $t$  segundos y el tiempo total vivido por los  $N - N_0$  núcleos que se desintegran es:  $t \cdot dN$ . Si integramos para valores de  $N$  entre  $N_0$  y 0, obtenemos el tiempo total vivido por los núcleos totales de la muestra:  $\int_{N_0}^0 t \cdot dN$ . Si ahora dividimos por el número total de átomos tenemos la vida media

En esta integral hay dos variables. Pasamos a escribir una en función de la otra. Como el número de átomos que se desintegran ( $dN$ ) es directamente

proporcional al número de átomos presentes ( $N$ ) y lo tiempo ( $dt$ ), tenemos:

$$\tau = \frac{\int_{N_0}^0 t \cdot dN}{N_0}$$

$$dN = -\lambda \cdot N \cdot dt$$

y como el número de átomos presentes en un instante concreto viene dado por la expresión:  $N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$ , resulta:

$$dN = -\lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \cdot dt$$

La expresión que nos sirve para calcular la vida media es:

$$\tau = -\frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N_0 e^{-\lambda t} t dt = -\lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt$$

que al integrar por partes resulta:  $\tau = 1/\lambda$

(Se hace  $t = u$  y  $dv = \lambda e^{-\lambda t} dt$ , con lo que resulta:  $du = dt$  y  $v = -e^{-\lambda t} / \lambda$

La integral se toma desde 0 hasta  $\infty$  ya que la desintegración es un proceso al azar y un determinado átomo puede vivir un tiempo "t" comprendido entre 0 y  $\infty$ . Vemos que **la vida media** es la inversa de la constante de desintegración y al relacionarla con el período de semidesintegración resulta que:

$$T_{1/2} = \ln 2 \cdot \tau.$$

Elementos radiactivos naturales

Núcleo	Símbolo	Vida Media
Uranio-235	$^{235}\text{U}$	$7.04 \times 10^8$ años
Uranio-238	$^{238}\text{U}$	$4.47 \times 10^9$ años
Torio-232	$^{232}\text{Th}$	$1.41 \times 10^{10}$ años
Radio-226	$^{226}\text{Ra}$	$1.60 \times 10^3$ años
Radón-222	$^{222}\text{Rn}$	3.82 días
Potasio-40	$^{40}\text{K}$	$1.28 \times 10^9$ años

## 7. PARTÍCULAS ELEMENTALES Y FUERZAS FUNDAMENTALES

Se ha descubierto un gran número de partículas bombardeando núcleos atómicos con *protones* y *electrones* de alta energía, dotados de velocidades muy grandes mediante aceleradores de partículas, pero estas partículas no han tenido ninguna influencia en la explicación del comportamiento de la *materia ordinaria*. Toda la materia ordinaria parece estar constituida por **electrones, protones y neutrones**.

Los *electrones* parecen ser indivisibles, pero los *neutrones* y *protones*, que han sido considerados como indivisibles experimentalmente, parecen estar compuestos por unas partículas llamadas **quarks**.

Además, cada partícula tiene su propia **antipartícula**. El *positrón* es la antipartícula del *electrón*, tiene la misma masa, pero su carga eléctrica positiva. El *antiproton*, que es la antipartícula del protón, está cargado negativamente. El *antineutrón* y el *neutrón* tienen momentos magnéticos opuestos.

Todas las fuerzas de la naturaleza se reducen a cuatro interacciones fundamentales: **la gravitatoria, la electromagnética, la nuclear fuerte y la nuclear débil**.

La *fuerza gravitatoria* es la más débil de todas. Su intensidad es aproximadamente  $10^{-39}$  veces la de la fuerza nuclear fuerte. Es universal y de atracción entre todos los cuerpos con masa. Teóricamente su alcance es ilimitado. Es la responsable de la estructura general del Universo.

La *fuerza electromagnética* es unas *cien veces menor* que la fuerza nuclear fuerte. Actúa entre partículas cargadas y puede ser atractiva y repulsiva. Es la responsable de que los átomos, moléculas y materia en general permanezcan unidos.

La *fuerza nuclear fuerte* es la más intensa de todas, pero de muy corto alcance. Esta fuerza mantiene unidas las partículas que componen el núcleo del átomo (fuerzas entre protón-protón-neutrón y fuerza entre quarks). Esta fuerza no se aprecia fuera del núcleo de los átomos.

La *fuerza nuclear débil* tiene un radio de acción muy corto ( $10^{-17}\text{m}$ ). Su intensidad es  $10^{-13}$  veces la de la interacción fuerte. Aparece en la *desintegración beta* de los núcleos radiactivos y actúa sobre los leptones.

**Partículas de materia**, se dividen en dos clases: **leptones y quarks**. En total existen doce partículas de materia, seis leptones y seis quarks. Estas doce partículas se agrupan en familias de cuatro.

La primera familia la componen los *quark up* y *down*, el *electrón* y el *neutrino del electrón*. Con estas cuatro partículas se pueden formar todos los átomos, moléculas y, en general, todos los materiales del Universo.

Las otras familias de partículas son aparentemente superfluas pues no se necesitan para formar la materia que conocemos, y sólo se producen en los grandes aceleradores de partículas. Se cree que estas partículas se formaron en los comienzos del Universo, pero al ser inestables se desintegran, esto explica que sólo se observen en los aceleradores de partículas, donde se alcanzan valores de energía muy altos, próximos a los que tenía el Universo en su nacimiento.

La segunda familia está compuesta por los *quarks charm* y *strange*, el *muón* y su *neutrino*; la última agrupa a los *quarks top* y *bottom*, el *tau* y el *neutrino del tau*. Las partículas de estas dos familias son muy parecidas a las de la primera, pero más pesadas.

**Partículas de fuerza**, existen cuatro partículas de fuerza, una por cada tipo de interacción.

La teoría explica las interacciones del siguiente modo: una partícula material emite una partícula de fuerza, el “retroceso” producido por esta emisión cambia la velocidad de la partícula material (algo parecido al retroceso de un cañón que dispara). La partícula de fuerza choca con otra partícula material

y es absorbida. Esta colisión cambia la velocidad de la segunda partícula (de nuevo se puede aplicar el símil mecánico de una bala que se incrusta en un bloque), justo igual a como si existiese una fuerza entre las dos partículas materiales. El intercambio constante de partículas de fuerza entre partículas materiales es equivalente a una fuerza.

Las partículas de fuerza se pueden agrupar en cuatro categorías según la intensidad de la fuerza que transmiten y el tipo de partículas con las que interactúan.

**Gravitón:** transmiten las fuerzas gravitatorias, que son muy débiles y sólo tienen efectos apreciables en los cuerpos de masa muy grande. El gravitón no tiene masa por lo que la fuerza que transmite es de largo alcance. La fuerza gravitatoria mantiene unidos a los planetas y estrellas.

**Bosones W y Z** transmiten la fuerza débil, que es la causante de los procesos radiactivos, como la desintegración del neutrón.

**Fotón** transmite la interacción electromagnética. Esta es una fuerza muy intensa, y puede ser atractiva o repulsiva en función de la carga de las partículas. Las fuerzas electromagnéticas son las que mantienen a los electrones girando al rededor del núcleo.

**Gluón** transmite la fuerza nuclear fuerte. El intercambio de gluones mantiene unidos a los nucleones en el núcleo atómico. Es una fuerza intensa pero de muy corto alcance.

Hadrones			
Bariones (ternas)		Mesones (pares)	
Masa	2.4 MeV 2/3 1/2	1.27 GeV 2/3 1/2	171.2 GeV 2/3 1/2
Carga	u Arriba d Abajo	c Encanto s Extraño	t Tope b Fondo
Espín	-1/3 1/2	-1/3 1/2	-1/3 1/2
Quarks			
Leptones			
Bosones			

Figura 8. El Modelo Estándar de la Física de Partículas



Uno de los objetivos de la física es unificar estas fuerzas de modo que todas sean manifestaciones de una sola interacción, de una fuerza única.

Maxwell realizó la unificación electromagnética, demostrando que las fuerzas eléctricas y magnéticas tienen su origen en una sola interacción.

Weinberg y Salam unificaron la interacción electromagnética y la interacción nuclear débil dando lugar a la *interacción electrodébil*.

Gell-Mann y Zweig unificaron la interacción electrodébil y la interacción nuclear fuerte.

TEORÍA	ESTÁNDAR	UNIFICACIÓN	GRAN UNIFICACIÓN	SUPERGRAVEDAD	
INTERACCIONES	gravitatoria	gravitatoria	gravitatoria	supergravedad	
	débil	electrodébil	fuerte-electrodébil		
	electromagnética				
	fuerte	fuerte			

Aún así, no se ha conseguido unificar las anteriores interacciones con la interacción gravitatoria. Probablemente en el futuro se encontrará una teoría que unifique las cuatro fuerzas fundamentales y pueda explicar el comportamiento último de la materia de todo el Universo.

## APLICACIONES DE LOS RADIOISÓTOPOS.

Los radioisótopos se comportan químicamente como sus isótopos estables, mezclándose íntimamente con ellos y comportándose como ellos en cualquier proceso físico, químico o biológico. Además ofrecen la ventaja de ser fácilmente detectables en cada instante, lo que permite “seguirlos” en cualquier proceso.

### a) En medicina:

- Localización de tumores cancerosos y tratamiento de los mismos. Por ejemplo yodo-131 se emplea para localizar el cáncer de tiroides. El cobalto-60 para destrucción de tejidos malignos, por ser sensibles a esta radiación.

- Estudio de la circulación sanguínea, previa inyección de sodio-24.

### b) En Biología:

- Estudio de la fotosíntesis con carbono-14.  
- Estudio de la acción de determinados antibióticos en el organismo, se marca con azufre radiactivo y se controlan sus efectos en el organismo.

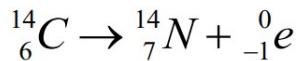
### c) En Química e Industria:

- Control de la acción de insecticidas.
- Determinación de espesores en planchas metálicas, de plástico,..
- Control de desgaste de paredes en altos hornos con cobalto-60.

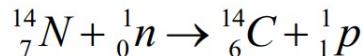
### d) Otras aplicaciones:

- Estudio de la migración de aves e insectos.
- Trazadores de los movimientos de aire y agua en la atmósfera.
- Determinación de la edad de animales y vegetales en función de la actividad que presenta el C-14.

La **datación del carbono-14** (C-14) consiste que en todos materia orgánica hay isótopos de C-14 ( $T_{1/2}=5730$  años), el cual se desintegra emitiendo partículas beta ( $\beta$ ).



Su velocidad para desintegrarse es igual que para formarse por lo que su proporción en el aire es constante (en el aire se forma por el bombardeo de nitrógeno por neutrones de los rayos cósmicos).



La proporción de  $C-12/C-14$  varía proporcionalmente al tiempo que la materia permanece muerta.

Así puedo estimar los años que hace que murió esa materia orgánica.

Solo es aplicable a objetos menores de 50.000 años, a mayor edad la proporción es tan pequeña que no puede medirse

El método se ha puesto en cuestión ya que supone que la proporción de C-14 ha permanecido invariable los últimos 50.000 años.

## FISIÓN NUCLEAR.

### Reactores nucleares:

La energía liberada en una reacción de fisión en cadena se aprovecha en los reactores nucleares para la producción de energía eléctrica o para la propulsión de submarinos o barcos de superficie.

La reacción en cadena que tiene lugar puede ser controlada en todo momento.

En la fisión del U-235 se utilizan principalmente neutrones lentos. Para reducir la velocidad de los neutrones obtenidos en la fisión se utiliza una sustancia moderadora, que debe estar formada por átomos ligeros como el carbono, el agua pesada, los neutrones al chocar con estos átomos ligeros pierden energía cinética y serán más lentos.

*Los elementos más importantes de un reactor nuclear son:*

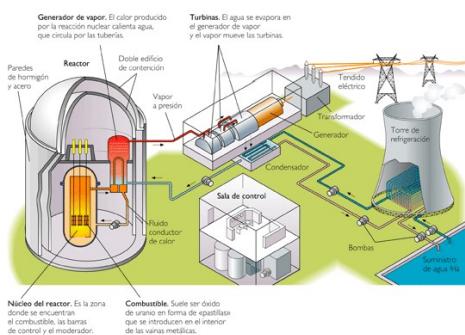
- El combustible: el material fisionable, se utilizan principalmente el U-235 y el 239 del plutonio.
- El moderador,
- Los elementos de control. Son unas barras de cadmio que pueden absorber neutrones. Introduciendo más o menos estas barras en la zona donde está el material fusionable puede regularse la reacción nuclear.
- Sistema de protección. contra las radiaciones procedentes del reactor. Suelen ser hormigón, plomo u otros materiales que absorben la radiación.
- Cambiador de calor. es un sistema que toma la energía liberada en la reacción nuclear y la convierte normalmente en energía mecánica mediante una turbina de vapor. Un fluido procedente del reactor calienta agua hasta producir vapor, la fuerza expansiva del vapor mueve una turbina y esta al rotor de un alternador.

**Ventajas e inconvenientes de la fisión:** La importancia energética del proceso radica en que cada átomo fisionado produce gran cantidad de energía. Cada gramo de uranio produce una cantidad de energía equivalente a 2000 toneladas de petróleo. La fisión del uranio genera multitud de subproductos radiactivos, alguno de ellos permanecen activos durante miles de años, el almacenamiento de esos productos es muy complicado y caro.

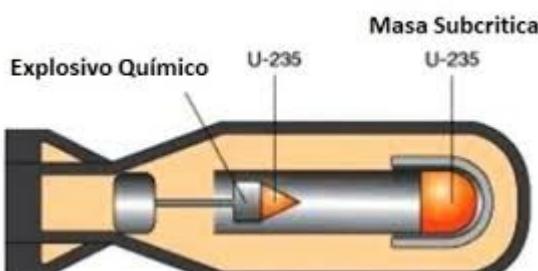
### Bomba atómica de fisión.

La bomba atómica consigue una reacción en cadena al fisionarse los átomos de U-235 o Pu-239 con la intervención de neutrones rápidos.

Para que se produzca la reacción el tamaño de la masa del material fisionable tiene que ser superior al recorrido medio que efectúan los neutrones desde que salen de un átomo escindido hasta alcanzar a otro átomo. Conseguida la masa crítica, la bomba estalla espontáneamente. Por lo tanto, la masa fisionable está constituida de varios fragmentos que se unen mediante un explosivo convencional cuando se quiere estallar la bomba atómica. Los efectos de a bomba atómica son debidos a la enorme energía calorífica liberada en una zona pequeña y a las radiaciones producidas en la fisión. La energía calorífica eleva rápidamente la temperatura y desplaza grandes masas de aire a gran presión.



### Bomba de Urano-235



## FUSIÓN NUCLEAR

Es la unión o fusión de núcleos ligeros para formar otros más pesados con pérdida de masa que se transforma en energía.

Los átomos empleados en el proceso de fusión son los isótopos del hidrógeno, protio ( $^1\text{H}$ ), deuterio ( $^2\text{H}$ ) y tritio ( $^3\text{H}$ ) y menos frecuente, algún isótopos del He y del Li. Para realizar la fusión se precisan temperaturas del orden de millones de grados, tan sólo así los núcleos poseen energía suficiente para vencer las fuerzas de repulsión. Por esta razón estas reacciones se denominan termonucleares.

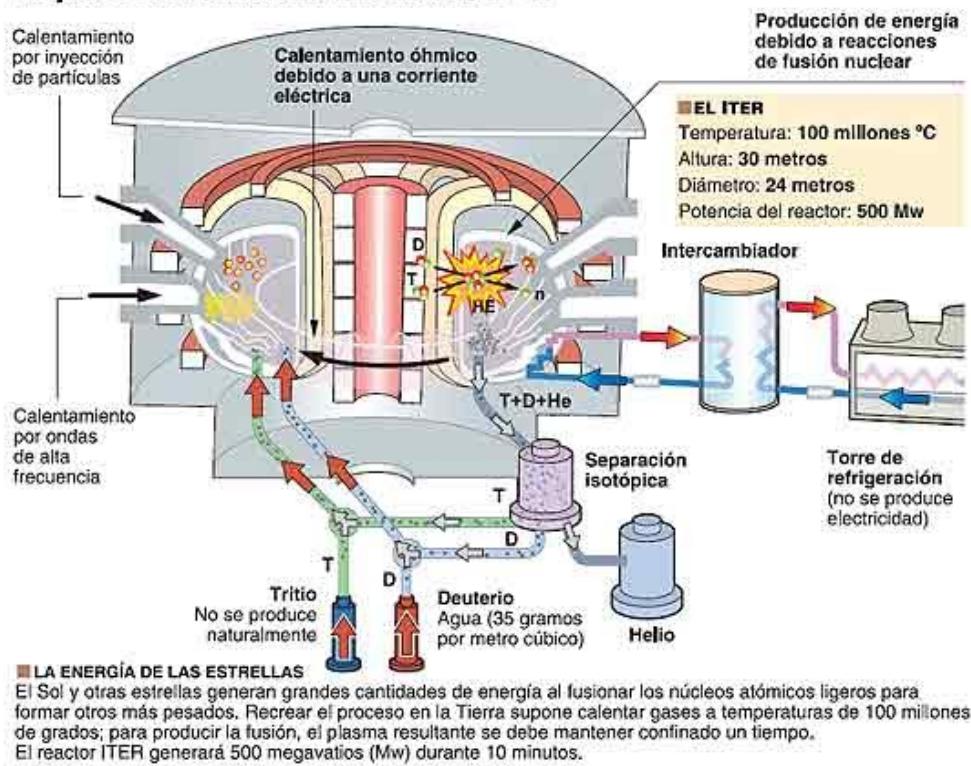
En el Sol se dan esas condiciones y debido a la fusión del hidrógeno que produce helio se libera la energía solar.

Para provocar la explosión de una bomba termonuclear de hidrógeno (bomba H) se eleva la temperatura de la masa de hidrógeno mediante una bomba atómica de U-235 o Pu-239 (bomba A).

**Ventajas e inconvenientes de la fusión:** la reacción es más limpia que la de fisión, ya que ningún producto es radiactivo, produce más energía que la fisión (3 frente a 1 MeV/nucleón), los reactivos son más abundantes, el deuterio y el tritio necesarios se pueden extraer del agua.

La reacción precisa elevadas temperaturas y campos magnéticos intensos para confinar el plasma, la tecnología necesaria es muy compleja.

### Esquema del funcionamiento del ITER



Fuente: ITER.

EL PAÍS