



## UNIDAD DIDÁCTICA Nº 11. FÍSICA NUCLEAR.

### 1 EL NÚCLEO DEL ÁTOMO.

#### 1.1.- Conceptos generales.

Como sabes, en el átomo se distinguen dos partes: **núcleo**, donde se localizan los protones y neutrones y la **corteza**, donde se encuentran los electrones.

La mayor parte de la masa está en el núcleo porque los electrones tienen una masa muy pequeña en comparación con la de los protones y neutrones. Además el tamaño del núcleo es muy pequeño en comparación con el del átomo. De hecho:  $R_{\text{átomo}} \cong 10^{-10}$  m y  $R_{\text{núcleo}} \cong 10^{-13}$  m.

También hay algunos conceptos que debes saber o recordar:

- El número de protones del núcleo se denomina **número atómico (Z)**. Es característico para cada elemento. Es decir, todos los átomos del mismo elemento tienen el mismo número atómico.
- El número de neutrones del núcleo no tiene nombre especial pero lo representaremos por la letra **N**.
- A los protones y neutrones se les denomina **nucleones** (por estar situados en el núcleo). Al número de nucleones se le denomina **número másico (A)**.
- Los elementos se representan mediante la notación:  
 ${}^A_Z X$ , donde X representa el símbolo correspondiente al elemento.

#### 1.2.- Clasificaciones de los núcleos.

Los núcleos de los elementos, también denominados nucleidos, se clasifican en función de cómo sea el número de partículas.

##### Isótopos.

Son nucleidos que tienen el mismo número de protones (igual Z) pero distinto número de neutrones y por tanto distinto número másico (A).

Ejemplo:  ${}^{12}_6\text{C}$  y  ${}^{13}_6\text{C}$ .

##### Isótonos.

Son nucleidos que tienen el mismo número de neutrones pero distinto número atómico. Por tanto también el número másico A, es distinto.

Ejemplo:  ${}^{13}_6\text{C}$  y  ${}^{14}_7\text{N}$

##### Isóbaros.

Son nucleidos que tienen el mismo número másico A pero difieren entre sí tanto en el número de protones como en el número de neutrones.

Ejemplo:  ${}^{40}_{19}\text{K}$  y  ${}^{40}_{20}\text{Ca}$

## 2 ESTRUCTURA Y CARACTERÍSTICAS DEL NÚCLEO.

### 2.1.- La masa del átomo.

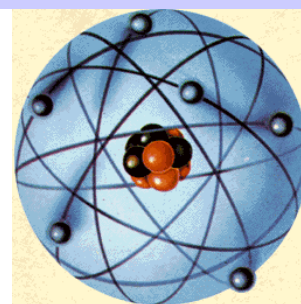
Ya sabes que para medir masas atómicas se utiliza una unidad lo suficientemente pequeña. Se denomina unidad de masa atómica (abreviadamente u).

Una unidad de masa atómica representa la doceava parte de la masa que posee el átomo de carbono 12.

La relación entre la unidad de masa atómica y la unidad de masa en el sistema internacional es:

$$1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

De esta forma, a cada una de los componentes del átomo le corresponde la siguiente masa:



Átomo de C-12

Partícula	Carga eléctrica (C)	Masa en kg	Masa en u	Radio (fermios) 1 fermio ( $1,2 \cdot 10^{-15}$ m)
Protón	$1,602 \cdot 10^{-19}$	$1,6726 \cdot 10^{-27}$ kg	1,00728 uma	1'2
Neutrón	0	$1,6749 \cdot 10^{-27}$ kg	1,00867 uma	1'2
Electrón	$-1,602 \cdot 10^{-19}$	$9,1096 \cdot 10^{-31}$ kg	$0,00055 \text{ u} \approx 0$	$\approx 0$

### 2.2.- El volumen del núcleo.

La forma del núcleo puede considerarse aproximadamente esférica, siendo su volumen proporcional al número de nucleones que lo forman (número másico).

Matemáticamente, la relación es:

$$R = r_0 \cdot A^{1/3}$$

siendo  $r_0$  una constante igual para todos los núcleos y cuyo valor es de  $= 1,2 \cdot 10^{-15}$  m. Este valor recibe el nombre de **femtómetro o fermio (fm)**.

Esto nos lleva a la conclusión de que los nucleones forman un empaquetamiento compacto. Es decir, que la densidad del núcleo es prácticamente la misma para todos los núcleos.

### 2.3.- Estabilidad nuclear.

Una vez que conocemos la composición del núcleo queda otro problema importante por explicar: El origen de la estabilidad del núcleo.

Para ello es necesario suponer la existencia de una nueva interacción denominada interacción nuclear, que debe tener las siguientes características:

1.- Debe de ser muy intensa pues debe ser capaz de superar la repulsión existente entre los

protones del núcleo.

2.- Debe ser de corto alcance, pues esta no se pone de manifiesto fuera del núcleo. Por tanto, deben tener un alcance del orden de magnitud del fermio. (Al contrario de las fuerzas gravitatorias y electromagnéticas, cuyo alcance es infinito).

3.- Es independiente de la carga eléctrica. Las interacciones p-p, n-n o p-n son iguales.

4.- La fuerza nuclear, que es de atracción, pasa a ser de repulsión a distancias menores que el fermio ya que si estas fuerzas siempre fuesen atractivas el núcleo colapsaría sobre si mismo.

Este tipo de interacción fue propuesta en 1935 por el japonés **H. Yukawa (1907 - 1981)**. Según su teoría la interacción nuclear fuerte se debe a unas partículas denominadas mesones que son intercambiadas entre las partículas del núcleo. La masa de un mesón oscila entre 100 y 200 veces la masa de un electrón.

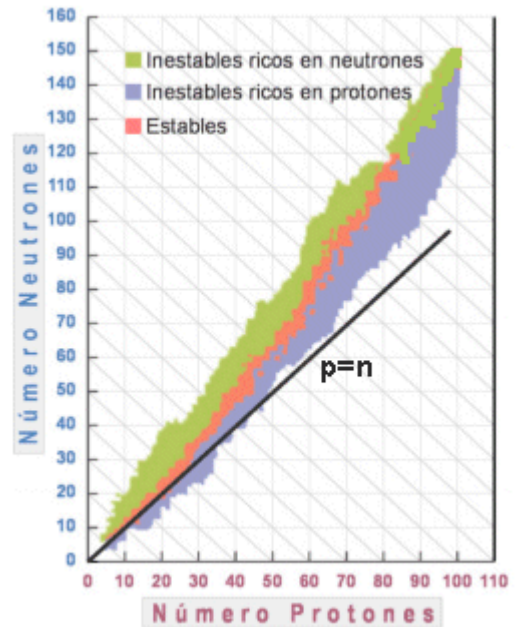
Es muy difícil obtener expresiones matemáticas para calcular el valor de la interacción nuclear puesto que esta interacción no depende únicamente de la distancia existente entre los nucleones sino también de magnitudes cuánticas como el spin.

Existen unos 400 núcleos estables. Hay muchos más, pero son inestables. En la gráfica tienes la representación de N frente a Z y coloreados, los núcleos estables.

Fíjate que el número de núcleos estables es menor que el de inestables. Además:

Los núcleos estables alcanzan la estabilidad con un número de protones igual al de neutrones. Conforme aumenta el número de protones, también lo hace el de neutrones pero en mayor proporción para compensar la repulsión, puesto que los protones solo experimentan fuerzas nucleares de atracción. Esto es debido a que con el número de protones aumenta la repulsión eléctrica y se necesitan más neutrones para mantener estable al núcleo.

Sin embargo, a partir de  $Z = 83$ , la repulsión eléctrica es tan grande que los neutrones no pueden compensarla ni siquiera en número elevado y por ello ya no hay núcleos estables.



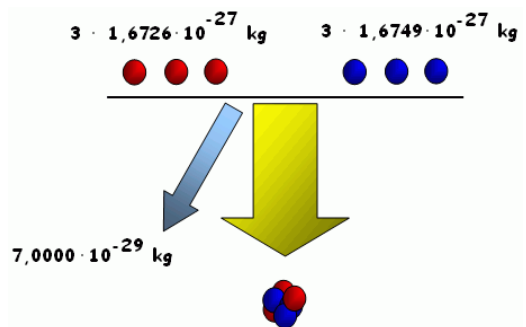
### 3 ENERGÍA DE ENLACE NUCLEAR.

#### 3.1.- Energía de enlace o de ligadura.

Otra forma de abordar la estabilidad nuclear es mediante el aspecto energético.

Al medir la masa de un núcleo siempre se comprueba que su masa es menor que la masa de los nucleones que lo forman. A esta pérdida de masa se le llama **defecto de masa ( $\Delta m$ )**. Matemáticamente se calcula mediante la expresión:

$$\Delta m = \sum m_{\text{nucleones}} - m_{\text{núcleo}}$$



La masa de un núcleo es menor que la suma de las masas de los nucleones que lo forman.

Esto, en términos energéticos significa que la energía de un núcleo es menor que la suma de las energías de las partículas que lo forman (suficientemente separados para que no haya interacción de ningún tipo entre ellos). Luego al formarse un núcleo se desprende energía que llamamos **energía de enlace o energía de ligadura** ( $\Delta E$ ).

Mediante la expresión dada por Einstein en su teoría de la Relatividad, esta energía de enlace se puede calcular conocido el defecto de masa mediante la expresión:

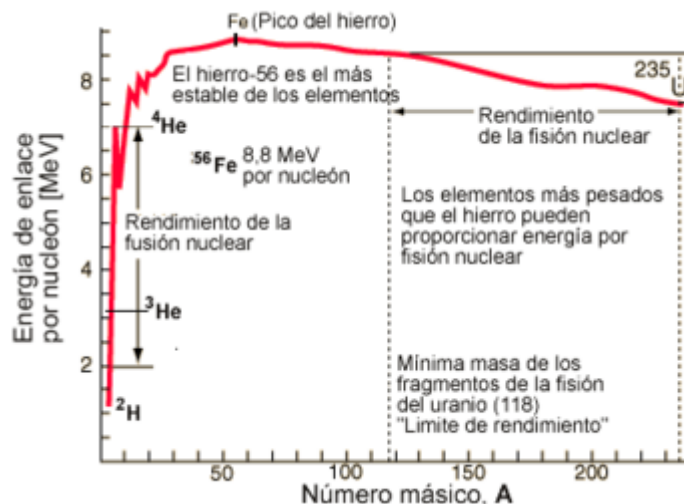
$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

Luego, esa pérdida de masa se traduce en una energía que se ha liberado. Cuanto mayor sea la pérdida de masa, mayor energía se libera.

### 3.2.- Energía de enlace por nucleón.

Para poder justificar la mayor estabilidad de unos núcleos con respecto a otros es conveniente recurrir al concepto de energía de enlace por nucleón. Este valor se obtiene mediante la expresión:

$$E_n = \frac{\Delta E}{A}$$



La energía de enlace por nucleón da cuenta de la estabilidad nuclear. A mayor valor, más estable será el núcleo.

Al representar la energía de enlace por nucleón en función del número másico, observamos distintas tres zonas en la gráfica. La situada más a la izquierda, ( $A < 30$ ) donde la energía de enlace por nucleón crece. Otra de máxima estabilidad (para  $30 \leq A \leq 60$ ) y otra donde la energía de enlace por nucleón decrece ( $A > 60$ ).

Por este motivo, si se consigue unir dos núcleos ligeros para obtener un núcleo más pesado (de  $A$  no mayor de 60), se producirá energía (la energía de enlace por nucleón del núcleo resultante es mayor). Al proceso se le denomina **fusión nuclear**.

Por el contrario, al romper un núcleo pesado para obtener dos más pequeños (situados en la zona de máxima estabilidad) también se produce energía. El proceso se denomina **fisión nuclear**.

#### Para resolver

1.- Razona por qué el  $^3_2\text{He}$  es más estable que el  $^3_1\text{H}$ . ( $^3\text{He} = 3,017977$  uma;  $^3\text{H} = 3,016966$  uma;  $m_p = 1,007276$  u;  $m_n = 1,008665$  u;  $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27}$  kg;  $c = 3 \cdot 10^8$  m·s<sup>-1</sup>).

Sol.: Hay mayor  $E_n$  en el  $^3_2\text{He}$  es mayor que en el  $^3_1\text{H}$ .

2.- a) Explique qué es el defecto de masa y calcule su valor para el isótopo  $^{14}_7\text{N}$ .

b) Calcule su energía de enlace por nucleón.

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $m_p = 1,007276 \text{ u}$ ;  $m_n = 1,008665 \text{ u}$ ;  $m({}^{14}_7\text{N}) = 14,0001089 \text{ u}$ ;  $1 \text{ u} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .

Sol.: a)  $\Delta m = 0,1114781 \text{ u}$ ; ( $E_n = 1,197 \cdot 10^{-12} \text{ J}$  (7,48 MeV).

3.- Halla la energía media de enlace, por nucleón, en MeV de un núcleo de  ${}^{20}_{10}\text{Ne}$ , sabiendo que la masa atómica del elemento es  $m_a = 19,99224 \text{ u}$ , la del electrón  $m_e = 0,0005486 \text{ u}$ ; la del protón  $m_p = 1,00728 \text{ u}$ , la del neutrón  $m_n = 1,00866 \text{ u}$ , la constante de Avogadro  $6,023 \cdot 10^{23} \text{ átomos/mol}$ , la velocidad de la luz en el vacío  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ; la carga del electrón  $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

Sol.:  $E_n = 8,06 \text{ MeV}$ .

4.- Determina el defecto de masa nuclear del  ${}^{16}_8\text{O}$ , cuya masa nuclear es  $15,99492 \text{ u}$ . Calcula también su energía de enlace nuclear y la energía de enlace por nucleón, expresada en J y en MeV. Datos: utiliza los del ejercicio anterior.

Sol.:  $\Delta m = 0,132726 \text{ u}$ ;  $\Delta E = 123,63 \text{ MeV}$ ;  $E_n = 7,7269 \text{ MeV} = 1,2363 \cdot 10^{-12} \text{ J}$ .

5.- a.- Calcula la energía total de enlace y la energía de enlace por nucleón para los siguientes isótopos:  ${}^4_2\text{He}$ ;  ${}^{16}_8\text{O}$ ;  ${}^{32}_{16}\text{S}$ ;  ${}^{107}_{47}\text{Ag}$ ;  ${}^{203}_{80}\text{Hg}$ .

b.- Representa las energías de enlace por nucleón del problema anterior incluyendo el del hierro. ¿Qué conclusiones se pueden establecer?

Datos: masas atómicas respectivas:  $m_p = 1,007276 \text{ u}$ ;  $m_n = 1,008665 \text{ u}$ ;  $\text{He} = 4'0026$ ;  $\text{O} = 15'9949$ ;  $\text{S} = 31'9721$ ,  $\text{Ag} = 106'9051$ ;  $\text{Hg} = 201'9706$ ;  $E_n \text{ Fe} = 8,7 \text{ MeV}$ ;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $1 \text{ u} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

Sol.:  $\text{He}$ :  $E_e = 27,51 \text{ MeV}$ ;  $E_n = 6,88 \text{ MeV}$ ;  $\text{O}$ :  $E_e = 120,08 \text{ MeV}$ ;  $E_n = 7,51 \text{ MeV}$ ;  $\text{S}$ :  $E_e = 265,80 \text{ MeV}$ ;  $E_n = 8,31 \text{ MeV}$ ;  $\text{Ag}$ :  $E_e = 898 \text{ MeV}$ ;  $E_n = 8,4 \text{ MeV}$ ;  $\text{Hg}$ :  $E_e = 1425 \text{ MeV}$ ;  $E_n = 7,02 \text{ MeV}$ .

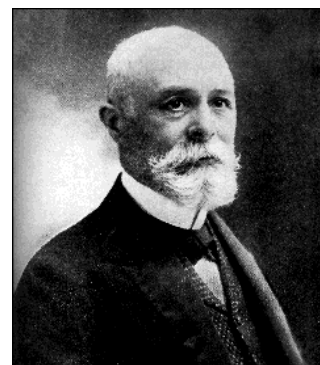
## 4 LA RADIOACTIVIDAD.

### 4.1.- El descubrimiento de la radiactividad.

En 1896, **Henri Becquerel** (1852-1908), que estaba estudiando fenómenos de fosforescencia en muestras de un compuesto de uranio, observó que las sales de uranio, eran capaces de impresionar una placa fotográfica aún en la oscuridad. Este fenómeno se producía cualquiera que fuese el compuesto de uranio.

Con posterioridad, **Rutherford** demostró que lo que fuese que producía este fenómeno también era capaz de ionizar el aire y provocar la descarga de los cuerpos cargados eléctricamente.

**Pierre y Marie Curie** iniciaron una investigación sistemática del fenómeno, llegando a la conclusión de que el fenómeno debía proceder del átomo de uranio. Además descubrieron otros elementos que podían producir los mismos fenómenos que el uranio incluso con mayor intensidad: el radio y el polonio.



Henri Becquerel (1852-1908)

Con estas investigaciones se definió la **radiactividad** como el fenómeno mediante el cual algunas sustancias pueden emitir radiaciones, las cuales pueden impresionar placas fotográficas, ionizar gases, atravesar cuerpos opacos, etc.

A las sustancias que presentan estas propiedades se les denomina **sustancias radiactivas**.

Hoy sabemos que la radiactividad es debido a que un núcleo inestable se fragmenta de forma espontánea emitiendo partículas que son las que denominamos radiaciones.

Estas radiaciones pueden ser de tres tipos:

- **Emisión  $\alpha$ .** El núcleo inestable emite dos protones y dos neutrones, es decir un núcleo de helio ( ${}^4_2\text{He}$ ).
- **Emisión  $\beta$ .** Ocurre cuando lo que el núcleo emite es un electrón ( ${}^0_{-1}\beta$ ) o un positrón ( ${}^0_{+1}\beta$ ).
- **Emisión  $\gamma$ .** El núcleo emite una onda electromagnética de frecuencia muy elevada ( ${}^0_0\gamma$ ).

Las dos primeras están relacionadas con cambios en la composición nuclear. La tercera obedece a una pérdida de energía del núcleo que se encuentra excitado tras una perturbación. De esta forma vuelve al estado fundamental.

No todos los núcleos radiactivos producen los tres tipos de emisiones.

#### 4.2.- Características de las radiaciones.

Las partículas alfa salen del núcleo con una velocidad enorme (aproximadamente  $10^7$  m/s). Pierden su energía por interacción con los electrones de los átomos y moléculas del medio por el que se desplazan, provocando una fuerte ionización del mismo al tener gran cantidad de movimiento. Pueden recorrer entre 3 y 8 cm en el aire y son detenidas por una hoja de papel de 0,5 mm.

Las partículas beta son más penetrantes que las alfa al tener aún mayor velocidad. Pero al tener menor masa y carga que las alfa, son menos ionizantes. Pueden recorrer 10 m en el aire y son detenidas por una chapa de aluminio de 5 mm o bien 2 mm de plomo.

Los fotones gamma son mucho más penetrantes puesto que no tienen carga ni masa, pueden ionizar indirectamente al chocar con electrones y provocar su expulsión de los átomos o las moléculas, aunque su capacidad de ionización es mucho menor. Pueden atravesar chapas de plomo de varios cm de espesor.

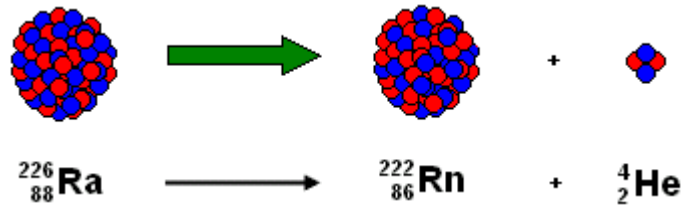
Resumen de las propiedades de las radiaciones alfa, beta y gamma			
Radiación	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
Naturaleza	Núcleos de helio ${}^4_2\text{He}$	e-	Radiación electromagnética
Carga	+2 e	-1 e	No tiene carga
Masa (u)	4	$\frac{1}{1836}$ la del protón	No tiene masa
Velocidad habitual	0,1 c	hasta 0,9 c	c
Energía	10 MeV	desde 0,03 a 3 MeV	1 MeV
Penetración	Detenidas por 5 cm de aire o 0,5 mm de papel	Detenidos por 5 mm de aluminio	La intensidad se reduce a la mitad por cada 100 mm de plomo.
Efecto de los campos magnéticos	Sí	Sí	No



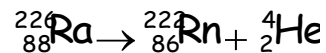
La actividad de una sustancia radiactiva no es permanente, sino que decrece con el tiempo. En algunos elementos este decrecimiento es muy rápido, y en otros es muchísimo más lento. Además, al mismo tiempo que la actividad de una sustancia radiactiva decae, comienzan a surgir átomos nuevos que no estaban al principio.

Por ejemplo, en una muestra de radio pura situada en un recipiente, donde se ha hecho el vacío (para que no haya ningún átomo más que los de radio), se comprueba, que con el tiempo, la muestra de radio pesa menos, y en el recipiente comienza a aparecer gas noble radón.

El fenómeno se explica porque cada átomo de radio emite una partícula radiactiva y se transforma en gas noble radón, según se muestra en la figura.



Esta transformación podemos formularla así:



A la vista de lo que ocurría, **Rutherford y Soddy**, en 1903, propusieron la **teoría de la desintegración radiactiva**. Según esta teoría:

a.- **Los elementos radiactivos no son estables.**

b.- **Para alcanzar la estabilidad, estos elementos experimentan desintegraciones espontáneas, emitiendo parte de si mismos (partículas alfa, beta, gamma u otros) y formándose un nuevo elemento.**

c.- **Este nuevo elemento puede, a su vez ser también inestable, con lo que a su vez puede seguir descomponiéndose y así sucesivamente hasta llegar a un átomo que ya es estable.**

#### 4.3.- Modos de desintegración radiactiva.

Los núcleos inestables, tienden a alcanzar la estabilidad mediante algunos de los siguientes procesos. En todos ellos se cumplen las siguientes reglas:

La desintegración se efectúa cumpliendo ciertas reglas:

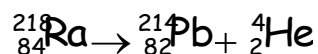
- 1.- El número de nucleones (A) se debe conservar
- 2.- La carga eléctrica se debe conservar
- 3.- La energía se debe conservar
- 4.- La cantidad de movimiento se debe conservar
- 5.- El movimiento angular (incluyendo el movimiento angular spin) se debe conservar.

**Emisión  $\alpha$ .** Cuando en una transformación radiactiva, se emite una partícula alfa, el elemento resultante se desplaza dos lugares hacia la izquierda en la Tabla Periódica. Es decir: se obtiene un nuevo elemento cuyo número atómico (Z) es dos unidades menor que el de su predecesor, siendo su número másico (A) cuatro unidades menor.

Esto es lógico, puesto que si se pierde una partícula alfa del núcleo, se pierden de golpe dos

protones y dos neutrones.

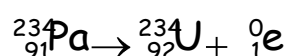
Por ejemplo:



En el proceso, la masa final del núcleo resultante y la de la partícula alfa es menor que la del núcleo inicial. Esa energía la posee la partícula alfa en forma de energía cinética.

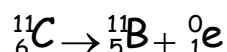
**Emisión  $\beta^-$ .** Cuando en una transformación radiactiva, se emite una partícula beta-, el elemento resultante se desplaza un lugar hacia la derecha en la Tabla Periódica. Es decir: se obtiene un nuevo elemento cuyo número atómico (Z) es una unidad mayor que el de su predecesor, pero su número másico (A) es el mismo. Esto es así, porque las partículas beta no vienen de la corteza del átomo, sino del núcleo. Un neutrón se rompe en un protón y un electrón. El electrón abandona el átomo y el protón permanece en el núcleo.

Por ejemplo:



Si se emitiese una partícula beta+, el elemento que se obtiene es una unidad menor que el de su antecesor, manteniéndose el mismo número másico.

Ejemplo:

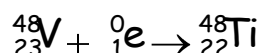


#### Captura electrónica orbital.

Los núcleos que presentan deficiencia de neutrones pueden capturar un electrón de la capa electrónica más cercana al núcleo (capa K). De esta forma, un protón se transforma en un neutrón. El número atómico disminuye en una unidad pero el número másico se mantiene constante.

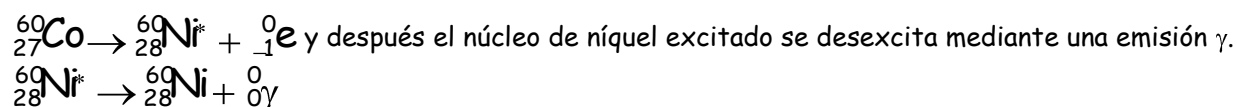
El proceso va acompañado de emisión de rayos X, producidos cuando un electrón exterior ocupa el hueco dejado por el electrón capturado.

Ejemplo:



**Emisión  $\gamma$ .** Cuando en una transformación radiactiva, se emite una radiación gamma, el átomo cambia únicamente su estado energético, no moviéndose de posición en la Tabla Periódica.

Por ejemplo, el Co-60 se desintegra según las siguientes reacciones:



#### 4.4.- Leyes de la desintegración radiactiva.

Se ha comprobado experimentalmente que la velocidad con la que se produce la desintegración de una muestra radiactiva no depende de factores externos tales como, la presión, la temperatura, el estado físico, o el tipo de compuesto que esté formando la sustancia radiactiva, sino que solamente depende de las características internas de los átomos, es decir: del número de protones y neutrones que tenga.

Lo que si es cierto es que un átomo es radiactivo porque es inestable, y tal átomo intentará alcanzar la estabilidad perdiendo parte de si mismo hasta que tenga un número de protones y neutrones tal



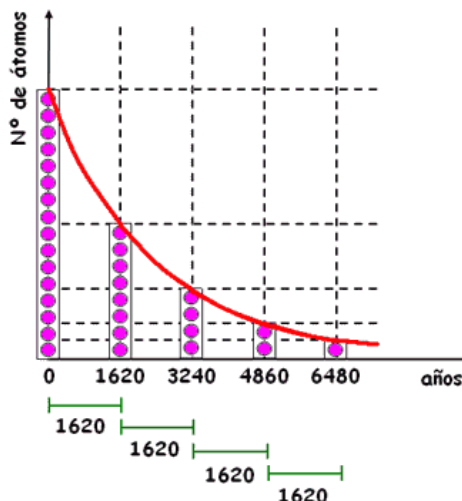
que se convierta en un átomo estable.

Sin embargo no es posible predecir cuando un determinado átomo se desintegrará, igual que es imposible predecir en que momento morirá cada persona. Por ejemplo, si tomamos una muestra de uranio, algunos de los átomos duraran miles o millones de años. En cambio, otros se desintegrarán a los pocos segundos.

Por este motivo, solamente se puede estudiar la velocidad de desintegración radiactiva de una muestra mediante la estadística.

Si disponemos de una cierta cantidad de átomos de una sustancia radiactiva, por ejemplo, de radio y medimos el número de átomos de radio presentes en la muestra a lo largo del tiempo. veremos que obtenemos una tabla que podemos representar gráficamente:

Tiempo (años)	Número de núcleos
0	16
1620	8
3240	4
4860	2
6480	1



Si observas bien la tabla y la gráfica, verás que en el caso del radio, cada 1620 años, el número de núcleos presentes disminuye a la mitad de los que había. Esto indica que el número de núcleos presentes en un determinado momento está relacionado con el número de núcleos iniciales mediante una **expresión exponencial**.

Es posible obtener una expresión matemática que nos permita calcular el número de núcleos que permanecerá al cabo de un determinado tiempo, conocido el número de núcleos iniciales.

En un proceso simple de desintegración radiactiva, el número de núcleos que se desintegran ( $-dN$ ) en un tiempo  $dt$  es directamente proporcional al número de núcleos presentes en un cierto momento y al intervalo de tiempo  $dt$ . Matemáticamente:

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

La constante de proporcionalidad  $\lambda$  recibe el nombre de constante de desintegración radiactiva y es característica del tipo de núcleo que se desintegra. Se mide en unidades de tiempo<sup>-1</sup>.

Esta expresión puede escribirse así:

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

donde  $-\frac{dN}{dt}$  representa la velocidad con la que se desintegran los núcleos en un determinado momento y se denomina actividad de la muestra ( $A$ ). La actividad se mide en desintegraciones/segundo, aunque es corriente utilizar otras unidades como el Curio(Ci)  $3,7 \cdot 10^{10}$  desintegraciones/s, Berquelio(Bq) 1 desintegración/s

$$A = \lambda \cdot N$$

La expresión  $-dN = \lambda \cdot N \cdot dt$  puede integrarse y obtendremos una nueva expresión que permite calcular el número de núcleos presentes en una muestra radiactiva transcurrido un tiempo determinado.

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

Donde:

$N$  = número de núcleos de la sustancia radiactiva presentes al cabo de un tiempo  $t$ .

$N_0$  = número de núcleos de la sustancia radiactiva presentes inicialmente.

$t$  = tiempo transcurrido (segundos, años, días, etc).

$\lambda$  = **constante de desintegración radiactiva**. Se mide en  $s^{-1}$ , años $^{-1}$ , días $^{-1}$ , etc. según la unidad en la que se exprese el tiempo transcurrido. Depende del elemento en cuestión y no depende del estado físico (sólido, gas, líquido) ni del estado químico (libre o combinado) en el que se encuentre el elemento.

Obviamente, si el número de núcleos varía con el tiempo, también lo hará la actividad. Se puede demostrar que se cumple que:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

Para usar esta expresión, es imprescindible que el tiempo esté en segundos.

Es útil conocer también otras magnitudes:

#### Periodo de semidesintegración.

Representa el tiempo que tarda una muestra radiactiva en **reducirse a la mitad**. El periodo de semidesintegración es característico de cada elemento.

La relación entre el periodo de semidesintegración y la constante radiactiva se obtiene a partir de la ecuación  $N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$

Al cabo de un tiempo igual al periodo de semidesintegración, el número de núcleos presentes será la mitad, con lo cual podemos sustituir  $N$  por  $N_0/2$ .

RADIOISÓTOPO	PERIODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN
Uranio – 235	$6,91 \cdot 10^8$ años
Uranio – 238	$4,51 \cdot 10^9$ años
Potasio – 40	$1,28 \cdot 10^9$ años
Rubidio – 87	$4,8 \cdot 10^{10}$ años
Calcio – 41	$1 \cdot 10^5$ años
Carbono – 14	5570 años
Radio – 226	1602 años
Cesio – 137	30,17 años
Bismuto – 207	38 años
Estroncio – 90	28 años
Cobalto – 60	5,271 años
Iodo – 131	8,04 días

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

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda \cdot T}$$

$$\ln \frac{1}{2} = \ln e^{-\lambda \cdot T}$$

$$-0,693 = -\lambda T$$

$$T = \frac{0,693}{\lambda}$$

#### Vida media de un núcleo.

Recibe el nombre de **vida media** de un núcleo radiactivo al tiempo que por término medio permanece un átomo sin desintegrarse. Matemáticamente se calcula como:

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

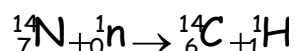
Cuanto mayor sea la constante radiactiva de un átomo, más pronto se desintegran los átomos de la muestra radiactiva y menor la vida media.

#### 4.5.- Datación de tejidos vivos mediante la prueba del C-14

Existen varios isótopos naturales del carbono. Son conocidos como C-12 (el más abundante), C-13 y C-14.

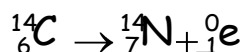
Químicamente los tres son idénticos pero el C-14 es radiactivo.

El C-14 se forma en la atmósfera debido al choque de los rayos cósmicos con el N-14, mediante la reacción:



El carbono-14 así formado se comporta como carbono ordinario, combinándose con oxígeno para dar dióxido de carbono e integrándose al ciclo del carbono a través de las plantas y animales.

Pero este carbono es radioactivo, así que una vez que ha sido formado, comienza a decaer, transformándose de nuevo en N-14 (Periodo de semidesintegración = 5730 años).



Sin embargo, como el ritmo de formación de C-14 también es constante, la cantidad de C-14 presente en los tejidos vivos también lo es puesto que el que se destruye, es incorporado mediante la alimentación. De esta forma la proporción C-14/C-12 se mantiene también constante e igual a la existente en la atmósfera.

Tan pronto como un animal o planta muere, la proporción de C-14 en los tejidos comienza a disminuir puesto que el que desaparece no es sustituido. De esta forma, conocida la relación que debería tener el organismo antes de su muerte y también la que existe en el momento del análisis, es posible conocer su antigüedad aproximada.



La técnica de datación por C-14 se utiliza para averiguar edades de objetos antiguos que contengan carbono. Por ejemplo esta máscara funeraria egipcia.

#### Para resolver

6.- El  ${}^{51}\text{Cr}$  tiene un periodo de semidesintegración de 27 días. Si tenemos en un momento dado, el número de Avogadro de átomos de dicho material, ¿cuántos quedarán al cabo de seis meses? ¿Y al cabo de diez años?

Sol.:  $5,931 \cdot 10^{21}$  núcleos; 0.

7.- La expresión de desintegración de una sustancia radiactiva es  $N = N_0 e^{-\lambda t}$  ( $\lambda$  viene dado en años $^{-1}$ ). Si en un momento dado tenemos  $10^6$  átomos de dicha sustancia, calcula cuántos habrá al cabo de un año.

Sol.: 998002 átomos.

8.- Supón que disponemos de 1 g de  ${}_{11}^{24}\text{Na}$ . ¿De cuántos átomos disponemos inicialmente? Construye una gráfica en la que se indique cómo varía el número de átomos radiactivos de la muestra en función del tiempo para un periodo de seis días. ¿Cuántos átomos de Na - 24 permanecen en la muestra transcurrido ese tiempo? Datos:  $T = 15$  h;  $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$  átomos /mol. Toma A como masa atómica del Na.

Sol.: a)  $2,51 \cdot 10^{22}$  átomos Na iniciales; c) A los seis días quedarán  $3,24 \cdot 10^{19}$  núcleos

9.- El período de semidesintegración del  ${}^{226}\text{Ra}$  es de 1620 años.

a) Explique qué es la actividad y determine su valor para 1 g de  $^{226}\text{Ra}$ .

b) Calcule el tiempo necesario para que la actividad de una muestra de  $^{226}\text{Ra}$  quede reducida a un dieciseisavo de su valor original.

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$$

Sol.: a)  $A = 9,612 \cdot 10^9$  desint/s; b) 6483 años.

10.- Una muestra de una sustancia radiactiva de 0,8 kg se desintegra de tal manera que, al cabo de 20 horas, su actividad se ha reducido a la cuarta parte. Calcule:

a) El periodo de semidesintegración.

b) El tiempo necesario para que se desintegren 0,7 kg.

Sol.: a)  $T = 10$  h; b) 30 h.

11.- En una muestra de madera de un sarcófago ocurren 13536 desintegraciones en un día por cada gramo, debido al C-14 presente, mientras que una muestra actual de madera análoga experimenta 920 desintegraciones por gramo en una hora. El periodo de semidesintegración del  $^{14}\text{C}$  es de 5730 años.

a) Establezca la edad del sarcófago.

b) Determine la actividad de la muestra del sarcófago dentro de 1000 años.

Sol.: a) 4046 años; b) 11994 desint/día · g (0,13882 desint/s·g)

12.- ¿Conociendo la cantidad de plomo que hay en cierto mineral de uranio, ¿cómo podríamos calcular la edad de dicha sustancia?

13.- ¿A cuánto se reduce el número de núcleos radiactivos presentes después que ha transcurrido un tiempo igual a la vida media? ¿Puedes hallar un paralelismo con otras áreas de la Física?

Sol.:  $N_0/e$

14.- El periodo de semidesintegración del  $^{60}\text{Co}$  es 5,3 años. Calcula la actividad de un gramo de dicha sustancia.

Sol.:  $A = 4,163 \cdot 10^{13}$  Bq.

15.- El radón-222 se desintegra con un periodo de 3,9 días, si inicialmente se dispone de 20  $\mu\text{g}$ . ¿Cuánto queda al cabo de 7,6 días?

Sol.: 5,18  $\mu\text{g}$ .

16.- ¿Cuánto tarda una muestra radiactiva de periodo de semidesintegración ( $T = 2$  días), en disminuir al 1 % de su valor original?

Sol.: 13,29 días.

17.- Una muestra de uranio-238 tiene una actividad de  $8 \cdot 10^2$  milicurios; determina sabiendo que su periodo de semidesintegración es de  $4,5 \cdot 10^9$  años. Dato:  $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10}$  desint/s.

a.- Su constante de desintegración.

b.- La masa de uranio de que se dispone en ese momento (masa atómica del uranio-238 = 238,051 u;  $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$ ).

Sol.: a.-)  $\lambda = 4,88 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$ . b.-)  $m = 2395,62 \text{ kg}$ .

#### 4.6.- Series radiactivas.

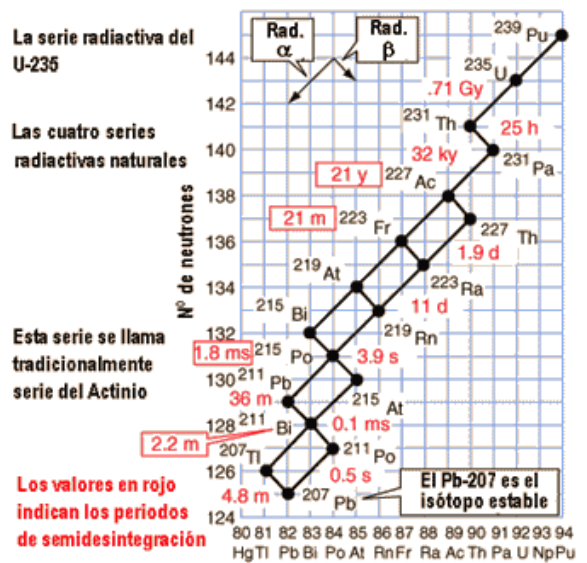
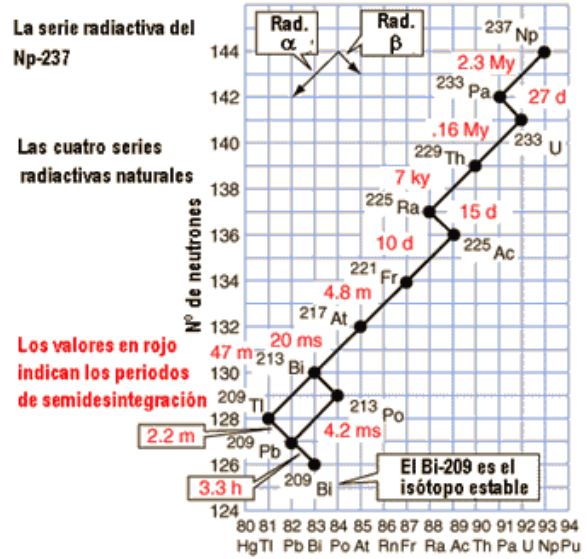
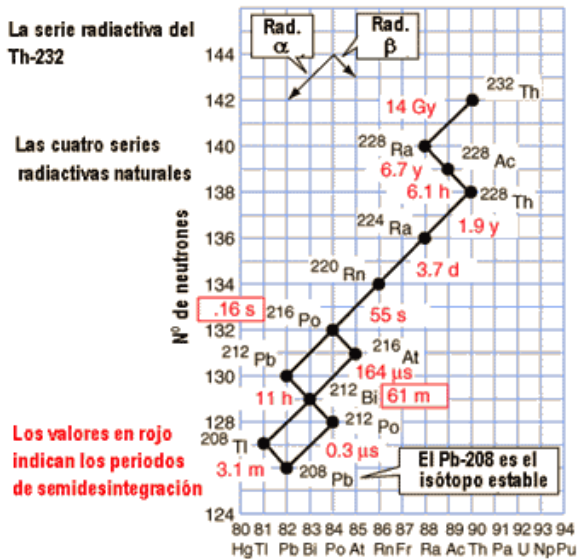
Según todo lo que hemos visto, los átomos de una sustancia radiactiva son inestables y se desintegrarán espontáneamente produciendo nuevas especies químicas. Pero estos átomos pueden a su vez ser inestables, con lo cual también se desintegrarán, transformándose en otro átomo y así sucesivamente.

El proceso continuará hasta que se produzca un elemento que sea estable. Nosotros no podemos influir en el proceso para acelerarlo o frenarlo de ninguna forma; solo podemos asistir al proceso como espectadores.

Esto lleva a la conclusión que los elementos se agrupan en **familias radiactivas**. Cada familia está constituida por el elemento de partida y los otros que de él se obtienen.

Actualmente se conocen cuatro familias o series radiactivas naturales:

- 1.- La familia del **Torio**: Es del tipo  $4n$ . Termina en un isótopo del plomo.
- 2.- La familia del **Neptunio**: Familia del tipo  $4n + 1$ . Está formada exclusivamente por isótopos de átomos obtenidos artificialmente. Empieza en el plutonio y termina en un isótopo del bismuto.
- 3.- La del **Uranio-Radio**: Sus elementos se caracterizan por poseer un número másico del orden  $4n + 2$ , siendo n un número entero. Terminan todos en un isótopo del plomo.
- 4.- La familia del **Actinio**: Es del tipo  $4n + 3$ . Sus elementos terminan todos en un isótopo del plomo.





## 5 OBTENCIÓN DE ELEMENTOS RADIOACTIVOS ARTIFICIALMENTE. TRANSMUTACIÓN ARTIFICIAL.

**Transmutar** significa cambiar. Es posible transformar un átomo en otro, sin más que conseguir introducir en el núcleo atómico alguna partícula, que modifique al menos su número atómico. La transmutación es similar a una reacción, pero no química, sino del tipo nuclear. Por este motivo a la rama de la ciencia que estudia estas transformaciones se la denomina Química nuclear y estas reacciones, **Reacciones nucleares**.

No debes confundir las reacciones nucleares con las reacciones químicas ordinarias. Hay una serie de diferencias. Por ejemplo:

- En las reacciones químicas los elementos no cambian, simplemente cambian las combinaciones con otros elementos. En cambio en las reacciones químicas cambian los elementos químicos obteniéndose en ellas otro u otros elementos nuevos que no existían.
- La energía puesta en juego en una reacción nuclear es mucho mayor que la que se intercambia en una reacción química, puesto que los cambios son mucho mayores.

Se consigue una reacción nuclear mediante el choque de partículas (normalmente una partícula cargada positivamente) con un núcleo. De esta forma la energía cinética de la partícula que choca hace que el nuevo núcleo esté en estado excitado y evolucione emitiendo partículas o dividiéndose.

Para que esto suceda, la partícula debe tener una energía cinética tal que pueda vencer la repulsión provocada por las fuerzas de Coulomb entre la partícula y el núcleo inicial y así acercarse lo suficientemente al núcleo para impactar con él y permitir que entren en juego las fuerzas de la interacción fuerte.

Si se usan como proyectiles los neutrones, éstos no muestran el problema de la repulsión eléctrica y pueden acceder libremente al núcleo.

Te muestro distintos ejemplos de reacciones nucleares. En todas ellas has de tener en cuenta que en toda reacción nuclear debe de conservarse tanto el número atómico como el número másico.

Normalmente, las reacciones nucleares solo representamos los núcleos y partículas que intervienen.

Por lo tanto, se deben cumplir dos condiciones:

- 1.- El número másico (A) se debe conservar.
- 2.- También se debe conservar la carga del núcleo.

Las reacciones pueden escribirse como una reacción química o en forma abreviada. Por ejemplo:

${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$  Donde el núcleo de Be, choca con una partícula alfa y se produce un nuevo núcleo de carbono y una nueva partícula que es un neutrón.

Esta reacción puede representarse según:

${}^9_4\text{Be}(\alpha, n) {}^{12}_6\text{C}$ , donde fuera del paréntesis y a la izquierda se escribe el núcleo inicial y a la derecha el nuevo núcleo obtenido. Dentro del paréntesis, se escribe a la izquierda la partícula incidente y a la derecha la partícula producida (si las hay).

En la tabla siguiente te presento algunas reacciones nucleares.

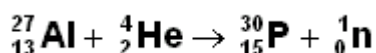


Reacción	Descripción
${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$	Una partícula alfa (núcleo de helio) choca con un núcleo de berilio. En el proceso se produce un núcleo de carbono y se emite un neutrón. ${}^9_4\text{Be}(\alpha, n) {}^{12}_6\text{C}$
${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow 2{}^4_2\text{He}$	Un protón choca con un núcleo de litio. En el proceso se producen dos núcleos de helio. ${}^7_3\text{Li}(p, \alpha) 2{}^4_2\text{He}$
${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{27}_{12}\text{Mg} + {}^1_1\text{H}$	Un núcleo de litio choca con un neutrón. Se produce un átomo de magnesio y se emite un protón (núcleo del átomo de hidrógeno). ${}^{27}_{13}\text{Al}(n, p) {}^{27}_{12}\text{Mg}$
${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{17}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$	Un núcleo de nitrógeno choca con una partícula alfa. Se produce un núcleo de oxígeno y un protón. ${}^{14}_7\text{N}(\alpha, p) {}^{17}_8\text{O}$
${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{30}_{15}\text{P} + {}^1_0\text{n}$	Un núcleo de aluminio es bombardeado con una partícula alfa. Se genera un núcleo de fósforo y un neutrón. ${}^{27}_{13}\text{Al}(\alpha, n) {}^{30}_{15}\text{P}$
${}^{16}_8\text{O} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{13}_6\text{C} + {}^4_2\text{He}$	Un núcleo de oxígeno choca con un neutrón. En el proceso se produce un núcleo de carbono y se emite una partícula alfa. ${}^{16}_8\text{O}(n, \alpha) {}^{13}_6\text{C}$
${}^9_4\text{Be} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^6_3\text{Li} + {}^4_2\text{He}$	Un núcleo de berilio choca con un protón. Se genera un núcleo de litio y se emite una partícula alfa. ${}^9_4\text{Be}(p, \alpha) {}^6_3\text{Li}$
${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^7_4\text{Be} + {}^1_0\text{n}$	Un núcleo de litio choca con un protón. Se genera un núcleo de berilio y se emite un neutrón. ${}^7_3\text{Li}(p, n) {}^7_4\text{Be}$
${}^{23}_{11}\text{Na} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^{23}_{11}\text{Na} + {}^0_0\gamma$	Un núcleo de sodio es bombardeado con un neutrón. Se produce un núcleo de sodio y una radiación gamma. ${}^{23}_{11}\text{Na}(n, \gamma) {}^{23}_{11}\text{Na}$
${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^0_0\gamma$	Un núcleo de litio reacciona con un protón. En el proceso se produce un núcleo de berilio y una radiación gamma. ${}^7_3\text{Li}(p, \gamma) {}^8_4\text{Be}$

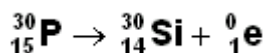
En todas las reacciones nucleares, también hay un **balance energético**. En ellas se producirá un cambio en la masa. Este cambio estará relacionado con la energía mediante la ecuación de Einstein.

Las transformaciones nucleares artificiales, con frecuencia llevan a la formación de nuevos núcleos que son inestables y por tanto son radiactivos, desintegrándose de forma similar a los núcleos radiactivos naturales. Por esto a este proceso se le denomina radiactividad artificial o inducida.

Por ejemplo, la reacción nuclear:



El núcleo de fósforo que se obtiene también es inestable y se desintegra emitiendo electrones positivos (positrones)



La preparación artificial de núcleos radiactivos se realiza generalmente mediante una reacción nuclear del tipo  $(n, \gamma)$ . En ellas se bombardea un núcleo utilizando como proyectil un neutrón y se produce un nuevo núcleo radiactivo y emisión de una radiación gamma. Actualmente se obtiene por este procedimiento más de 100 tipos de isótopos radiactivos usados en Medicina, Industria, Agricultura e Investigación.

En el cuadro siguiente se indican algunos de los isótopos radiactivos más comunes:

Núcleo	Periodo de semidesintegración	Reacción de obtención
${}_{6}^{14}\text{C}$	5730 años	${}_{7}^{14}\text{N} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{6}^{14}\text{C} + {}_1^1\text{H}$
${}_{11}^{24}\text{Na}$	15 horas	${}_{11}^{23}\text{Na} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{11}^{24}\text{Na} + {}_0^0\gamma$
${}_{15}^{32}\text{P}$	14 días	${}_{15}^{31}\text{P} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{15}^{32}\text{P} + {}_0^0\gamma$
${}_{16}^{35}\text{S}$	87 días	${}_{16}^{34}\text{S} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{16}^{35}\text{S} + {}_0^0\gamma$
${}_{27}^{60}\text{Co}$	5,3 años	${}_{27}^{59}\text{Co} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{27}^{60}\text{Co} + {}_0^0\gamma$
${}_{53}^{131}\text{I}$	8 días	${}_{52}^{130}\text{Te} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{52}^{131}\text{Te} + {}_0^0\gamma$ ${}_{52}^{131}\text{Te} \rightarrow {}_{53}^{131}\text{I} + {}_1^0\text{e}$
${}_{79}^{198}\text{Au}$	2,7 días	${}_{79}^{197}\text{Au} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{79}^{198}\text{Au} + {}_0^0\gamma$

#### Para resolver

18.- a) ¿Cómo se puede explicar que un núcleo emita partículas  $\beta$  si en él sólo existen neutrones y protones?

b) El  ${}_{90}^{232}\text{Th}$  se desintegra, emitiendo 6 partículas  $\alpha$  y 4 partículas  $\beta$ , dando lugar a un isótopo estable del plomo. Determine el número másico y el número atómico de dicho isótopo.

Sol.: b)  $A = 208$ ;  $Z = 82$ .

19.- El  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ , emite partículas alfa dando lugar a Rn.

a) Escriba la ecuación de la reacción nuclear y determine la energía liberada en el proceso.

b) Calcule la energía de enlace por nucleón del Ra y del Rn y discuta cuál de ellos es más estable.

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ;  $m_{\text{Ra}} = 226,025406 \text{ u}$ ;  $m_{\text{Rn}} = 222,017574 \text{ u}$ ;  $m_{\text{p}} = 1,00795 \text{ u}$ ;  $m_{\text{n}} = 1,00898 \text{ u}$ ;  $m_{\alpha} = 4,002603 \text{ u}$ ;  $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .

Sol.: a)  ${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + {}_2^4\text{He}$ ;  $ER = 7,812 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ ; b)  $En_{\text{Ra}} = 1,2649 \cdot 10^{-12} \text{ J}$ ;  $En_{\text{Rn}} = 1,2702 \cdot 10^{-12} \text{ J}$ . Más estable es el Rn.

20.- El núcleo radiactivo  ${}_{92}^{231}\text{U}$  se desintegra, emitiendo partículas alfa, con un período de semidesintegración de 72 años.

a) Escriba la ecuación del proceso de desintegración y determine razonadamente el número másico y el número atómico del núcleo resultante.

b) Calcule el tiempo que debe transcurrir para que su actividad se reduzca al 75 % de la inicial.

Sol.:  ${}_{92}^{231}\text{U} \rightarrow {}_{90}^{227}\text{Th} + {}_2^4\text{He}$ ;  $A = 232$ ;  $Z = 90$ ; b)  $t = 29,9$  años.

21.- El  ${}_{5}^{12}\text{B}$  se desintegra radiactivamente en dos etapas: en la primera el núcleo resultante es  ${}_{6}^{12}\text{C}^*$  (\* = estado excitado) y en la segunda el  ${}_{6}^{12}\text{C}^*$  se desexcita, dando  ${}_{6}^{12}\text{C}$  (estado fundamental).

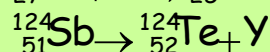
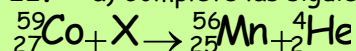
a) Escriba los procesos de cada etapa, determinando razonadamente el tipo de radiación emitida en cada caso.

b) Calcule la frecuencia de la radiación emitida en la segunda etapa si la diferencia de energía entre los estados energéticos del isótopo del carbono es de 4,4 MeV.

$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ;  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .

Sol.: a) Etapa 1:  ${}_{5}^{12}\text{B} \rightarrow {}_{6}^{12}\text{C}^* + {}_{-1}^0\beta$ ; Etapa 2:  ${}_{6}^{12}\text{C}^* \rightarrow {}_{6}^{12}\text{C} + {}_{0}^0\gamma$ ; b)  $f = 1,067 \cdot 10^{21} \text{ Hz}$ .

22.- a) Complete las siguientes reacciones nucleares:



b) Explique en qué se diferencian las reacciones nucleares de las reacciones químicas ordinarias.

Sol.:  ${}_{27}^{59}\text{Co} + {}_0^1\text{n} \rightarrow {}_{25}^{56}\text{Mn} + {}_{+2}^4\text{He}$ ;  ${}_{51}^{124}\text{Sb} \rightarrow {}_{52}^{124}\text{Te} + {}_{-1}^0\beta$

23.- Un elemento de número atómico 84 se desintegra produciendo otro de número atómico 83. ¿Cómo es la desintegración?

Sol.:  ${}_{84}X \rightarrow {}_{83}X + {}_{+1}^0\beta$  Se trata de una desintegración  $\beta^+$ .

### 5.1.- Aplicaciones de los isótopos radiactivos

Los isótopos radiactivos o radioisótopos se comportan químicamente exactamente igual que sus isótopos estables, pero además ofrecen la gran ventaja de ser fácilmente detectables en cualquier momento, lo que permite seguirlos en cualquier proceso.

Algunas aplicaciones de los radioisótopos son:

#### a.- En medicina:

- Para localizar tumores cancerosos y para eliminarlos.
- Estudio de la circulación sanguínea, mediante inyección intravenosa de sodio radiactivo.



Bomba de cobalto usada en radioterapia.

#### b.- En biología.

- Estudio de la fotosíntesis con C-14.
- Estudio del efecto de antibióticos en el organismo. Para ellos se marca el antibiótico con algún átomo radiactivo.
- Estudio de la fijación del calcio en los huesos mediante el calcio radiactivo.

**c.- En química e Industria.**

- Análisis químico.
- Control de acción de insecticidas.
- Determinación de espesores en planchas metálicas, de plástico, etc.
- Control de desgaste de paredes en hornos altos con Co-60.
- Control de circulación de petróleo en los oleoductos con Ba-140.

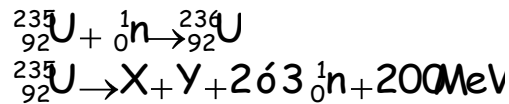
**d.- Otras aplicaciones.**

- Producción de esterilidad en especies nocivas.
- Trazadores de los movimientos de aire y agua en la atmósfera.
- Determinación de la edad en seres (animales o vegetales) en función de la actividad que presenta el C-14. Así se logran determinar fechas muy aproximadas para determinados hechos históricos.

## 6 FISIÓN NUCLEAR.

### 6.1.- ¿Qué es la fisión nuclear?

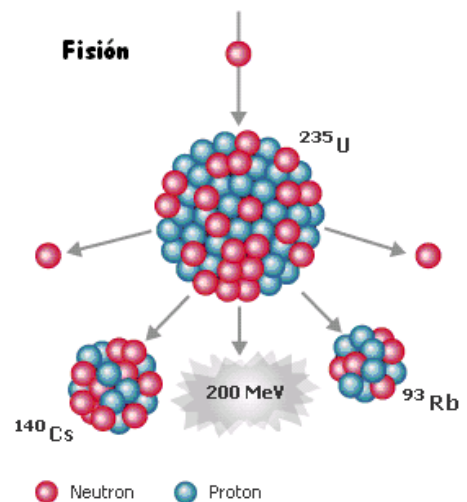
Se denomina fisión nuclear a la división de un núcleo pesado (U, Th, ...) en dos fragmentos cuyas masas son similares. La fisión espontánea es prácticamente inexistente. Sin embargo puede provocarse la fisión mediante el bombardeo con neutrones. Así si bombardeamos un núcleo de U-235 con neutrones térmicos, se producirá las siguientes reacciones nucleares:



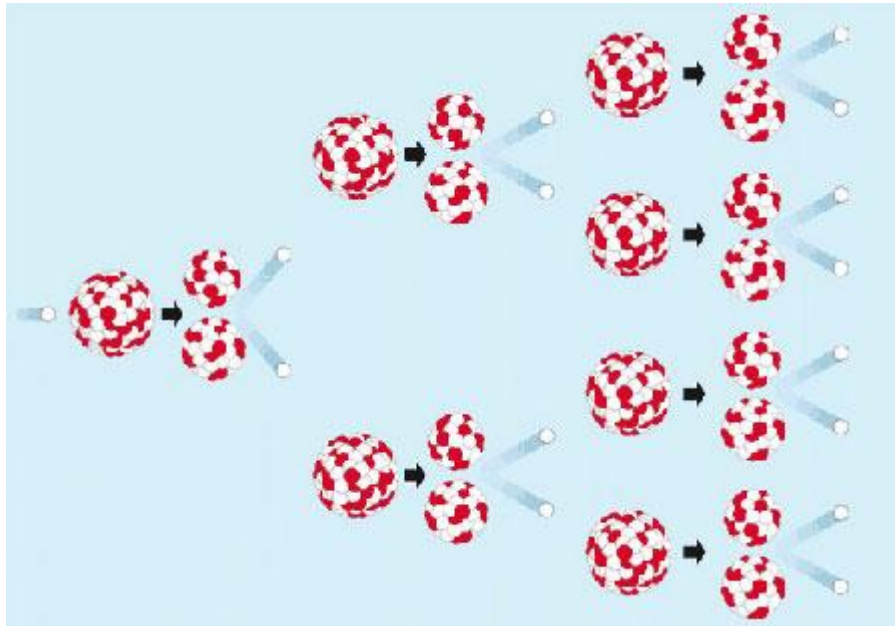
Los neutrones térmicos son aquellos que han sido frenados mediante choques con la materia para que posean la velocidad de agitación térmica del medio.

La energía liberada proviene del defecto de masa. Los fragmentos X e Y son nucleidos cuyos números másicos están comprendidos entre 84 - 104 y 129 - 149 respectivamente.

Los 2 ó 3 neutrones pueden chocar así con otros átomos de U-235 provocando nuevas fisiones y así sucesivamente (**Reacción en cadena**). Si se permite que los neutrones que se producen, choquen con otros tantos núcleos de U-235, los núcleos que se fisionan crecen en progresión geométrica. La reacción nuclear transcurre de forma explosiva. Tendremos una **bomba atómica de fisión**.

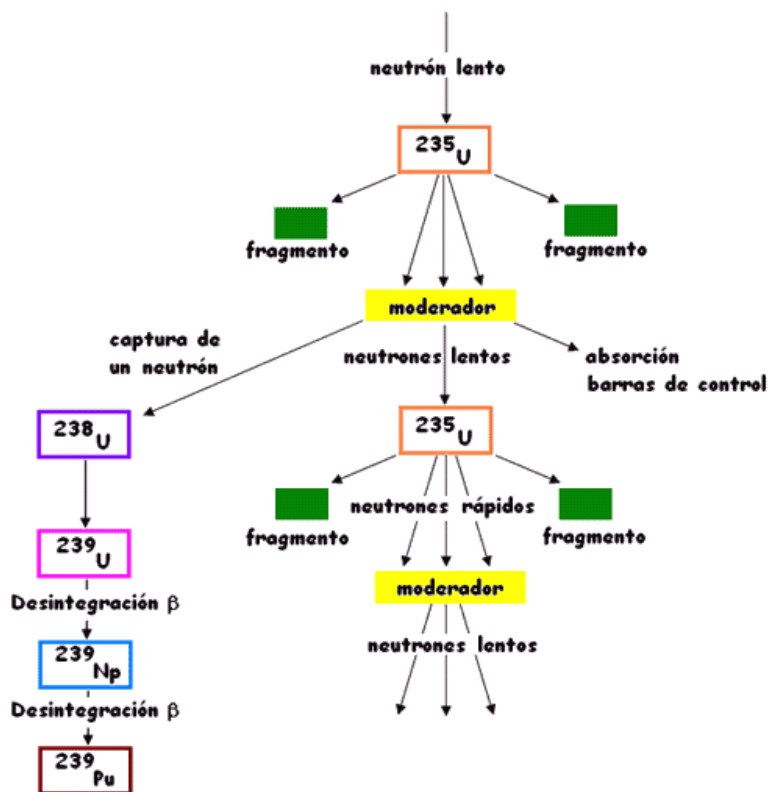


Esquema de una reacción de fisión. Los núcleos resultantes son de Cs y Rb.



Reacción en cadena descontrolada.

En cambio si se puede controlar la velocidad de fisión de los átomos de U, podremos conseguir que se libere lentamente esta energía. Esto se pudo conseguir finalmente cuando se descubrieron sustancias capaces de frenar e incluso absorber el exceso de neutrones que se produce en cada fisión, manteniendo la velocidad en unos niveles razonables. A estas sustancias se las denominó **moderadores**, y las más usuales son: agua pesada, berilio, carbón, cadmio...



Reacción nuclear en cadena controlada.

En toda reacción de fisión se define el denominado "factor de multiplicación k" como el cociente entre el número de neutrones emitidos en un intervalo de tiempo y la suma de los neutrones

absorbidos y perdidos en ese tiempo:

Matemáticamente:

$$k = \frac{\text{neutrones emitidos}}{\text{neutrones absorbidos} + \text{neutrones perdidos}}$$

Una reacción en cadena será:

- **Crítica o estacionaria**, si  $k = 1$ . Es la que se mantiene en un reactor nuclear.
- **Supercrítica**, si  $k > 1$ . La reacción no se puede controlar. Explosión.
- **Subcrítica**, si  $k < 1$ . La reacción se detiene.

Solamente podrá alcanzarse como mínimo una reacción crítica o estacionaria con una masa mínima de material fisionable. De lo contrario, la reacción nuclear siempre será subcrítica. A la masa mínima necesaria se le denomina **masa crítica**.

## 6.2.- Centrales nucleares de fisión.

En una central nuclear se consigue aprovechar la energía desprendida en la fisión nuclear.

El material utilizado como combustible es óxido de uranio enriquecido en el isótopo de uranio-235, de forma que el porcentaje de este isótopo oscila entre un 2 y un 3,5 %. Haz de saber que la mayoría del uranio existente en la naturaleza es U-238. La proporción de U-235 en el uranio natural es sólo de 0.72%, por lo que es necesario someterlo a un proceso de enriquecimiento en este nucleido. Realmente es el U-235 el que se desintegra.

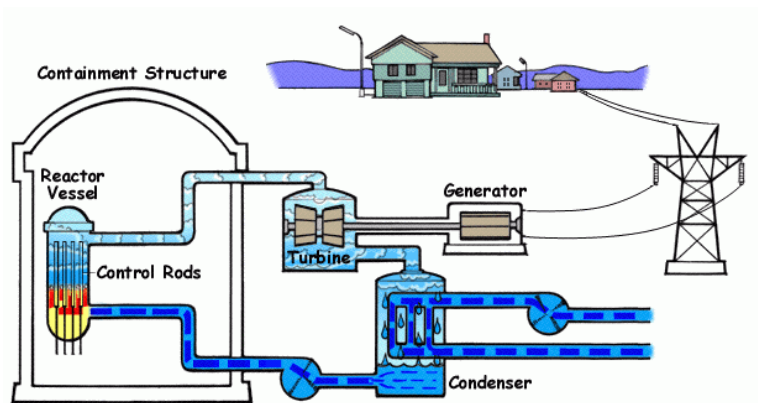
El U va situado en unas barras. Al producirse la fisión de algún átomo de U-235, se producen neutrones. Estos van muy rápidos y se hace necesario frenarlos (para que se transformen en neutrones térmicos). De esta forma existen más posibilidades para que se produzca la captura de los neutrones por los átomos de U-235. Para ello se utiliza el moderador. Los neutrones chocan con los núcleos del moderador y pierden energía hasta encontrarse en equilibrio térmico con el sistema (por ello se les denomina neutrones térmicos). Algunos de ellos llegarán a chocar con átomos de U-235 en las condiciones adecuadas para producir reacción (otros no producen reacción, o simplemente escapan del reactor, motivo por el cual éste debe estar aislado).

Como moderador se usa una sustancia de número básico bajo (agua, grafito, etc.)

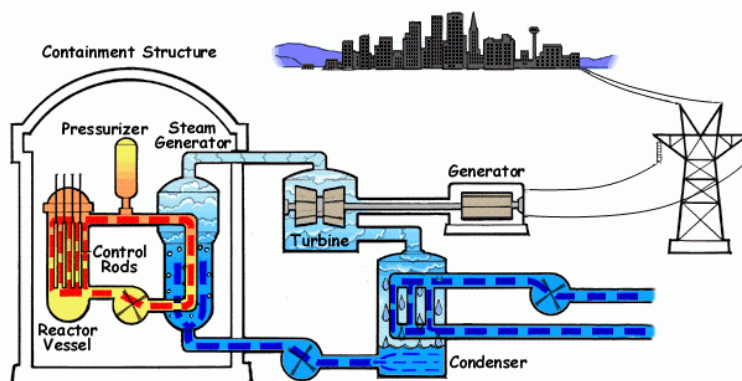
Para evitar que la reacción pueda ir muy rápida es necesario disponer de un sistema de control de la velocidad de la reacción nuclear. Este está formado por las barras de control. Está formado por barras de boro o cadmio que se intercalan entre las barras del combustible. Su misión es capturar los neutrones para impedir que puedan chocar con los átomos del combustible. Introduciendo o sacando las barras de control se logra mantener constante el número de fisiones por segundo en el reactor.

La energía obtenida en la fisión, se recupera mediante un fluido que envuelve al conjunto, denominado refrigerante. Este fluido circula por el interior del reactor, extrayendo el calor y cediéndolo a otro circuito mediante un intercambiador de calor. El vapor generado en el segundo circuito será el que mueva una turbina y genere energía eléctrica.





Reactor nuclear del modelo de agua a ebullición.



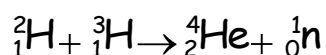
Reactor nuclear del modelo de agua a presión.

## 7 FUSIÓN NUCLEAR.

En la fusión nuclear se unen dos núcleos ligeros para formar uno más pesado. En este proceso se desprende energía porque la masa del núcleo pesado es menor que la suma de las masas de los núcleos más ligeros.

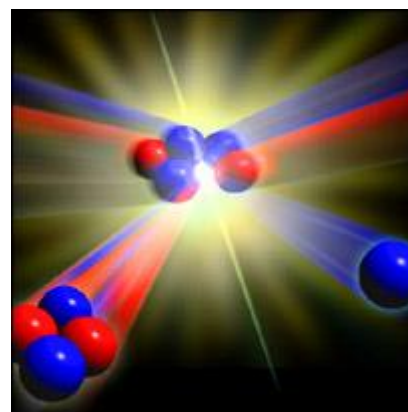
Este defecto de masa se transforma en energía según la expresión de Einstein:  $E = m \cdot c^2$ .

La energía producida en una reacción nuclear dependerá siempre de los núcleos que se unen y de los productos de la reacción. La más fácil de conseguir es la fusión entre un átomo de deuterio (1 protón + 1 neutrón) y uno de tritio (1 protón + dos neutrones).



En el proceso se libera una energía de 17,6 MeV.

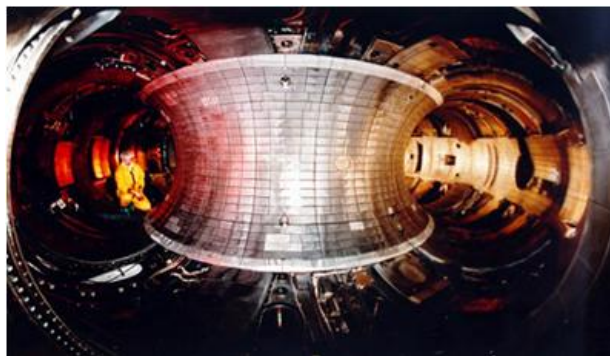
Es una fuente de energía prácticamente inagotable, ya que el deuterio se encuentra en el agua de mar y el tritio es fácil de producir a partir del neutrón que escapa de la reacción.



Reacción nuclear de fusión. Un núcleo de deuterio se une a otro de tritio para producirse un núcleo de helio y un protón.

## Tecnología

Esta reacción que se ha descrito antes es la más fácil de conseguir, pero no quiere decir que sea sencillo lograr energía de las reacciones de fusión. Para ello se deben unir los núcleos de dos átomos, el problema radica en que los núcleos de los átomos están cargados positivamente, con lo que al acercarse cada vez se repelen con más fuerza. Una posible solución sería acelerarlos en un acelerador de partículas y hacerlos chocar entre sí pero se gastaría más energía en acelerarlos que la que se obtendría con las reacciones.



El Tokamak es el más moderno reactor de fusión. Está aún en fase experimental.

Para solucionar este problema se comprimen esferas de combustible mediante haces de láseres o de partículas teniendo así la llamada *fusión por confinamiento inercial* en la que se obtienen densidades muy elevadas, de manera que los núcleos están muy cercanos entre ellos, y por efecto túnel se fusionan dando energía.

La otra forma de producir reacciones de fusión de manera que se gane energía es calentando el combustible hasta temperaturas de millones de grados de manera que los choques entre núcleos sean por agitación térmica. Como al estar a tan alta temperatura el combustible se disocia en partículas con cargas positivas y negativas, éste se puede controlar mediante campos magnéticos, ésta es la *fusión por confinamiento magnético*.

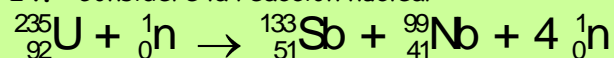
## Ventajas de la fusión

La fusión nuclear es un recurso energético potencial a gran escala, que puede ser muy útil para cubrir el esperado aumento de demanda de energía a nivel mundial, en el próximo siglo. Cuenta con grandes ventajas respecto a otros tipos de recursos:

- 1.- Los combustibles primarios son baratos, abundantes, no radioactivos y repartidos geográficamente de manera uniforme (el agua de los lagos y los océanos contiene hidrógeno pesado suficiente para millones de años, al ritmo actual de consumo de energía).
- 2.- Sistema intrínsecamente seguro: el reactor sólo contiene el combustible para los diez segundos siguientes de operación. Además el medio ambiente no sufre ninguna agresión: no hay contaminación atmosférica que provoque la "lluvia ácida" o el "efecto invernadero".
- 3.- La radiactividad de la estructura del reactor, producida por los neutrones emitidos en las reacciones de fusión, puede ser minimizada escogiendo cuidadosamente los materiales, de baja activación. Por tanto, no es preciso almacenar los elementos del reactor durante centenares y millares de años.

## Para resolver

24. - Considere la reacción nuclear:



a) Explique de qué tipo de reacción se trata y determine la energía liberada por átomo de Uranio.

b) ¿Qué cantidad de  ${}_{92}^{235}\text{U}$  se necesita para producir  $10^6$  kWh?

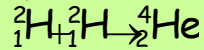
$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  ;  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$  ;  $m_U = 235,128 \text{ u}$  ;  $m_{Sb} = 132,942 \text{ u}$  ;  $m_{Nb} = 98,932 \text{ u}$  ;

$m_n = 1,0086 \text{ u}$  ;  $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .

Sol.: a) Reacción de fisión;  $E = 3,4093 \cdot 10^{-11} \text{ J/átomo}$ ; b)  $0,0412 \text{ kg}$ .

25. - a) En la reacción del  ${}^6_3\text{Li}$  con un neutrón se obtiene un nucleido X y una partícula alfa. Escriba la reacción nuclear y determine las características del nucleido X resultante..

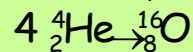
b) Calcule la energía liberada en la reacción de fusión:



$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ;  $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  ;  $m({}^4_2\text{He}) = 4,0026 \text{ u}$  ;  $m({}^2_1\text{H}) = 2,0141 \text{ u}$ .

Sol.: a)  ${}^6_3\text{Li} + {}^1_0\text{n} \rightarrow {}^3_1\text{X} + {}^4_2\text{He}$   $A = 3$ ;  $Z = 1$  (Tritio) b)  $E = 3,825 \cdot 10^{-12} \text{ J}$ .

26. - Suponga una central nuclear en la que se produjera energía a partir de la siguiente reacción nuclear de fusión:



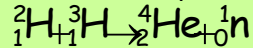
a) Determine la energía que se produciría por cada kilogramo de helio que se fusionase.

b) Razone en cuál de los dos núcleos anteriores es mayor la energía de enlace por nucleón.

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ;  $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  ;  $m({}^4_2\text{He}) = 4,0026 \text{ u}$  ;  $m({}^{16}_8\text{O}) = 15,9950 \text{ u}$ .

Sol.: a)  $8,65 \cdot 10^{13} \text{ J}$ ; b) En el  ${}^{16}_8\text{O}$ .

27. - En la explosión de una bomba de hidrógeno se produce la reacción:



Calcule:

a) El defecto de masa del  ${}^4_2\text{He}$ .

b) La energía liberada en la formación de  $10 \text{ g}$  de helio.

Datos:  $m({}^2_1\text{H}) = 2,01474 \text{ u}$  ;  $m({}^3_1\text{H}) = 3,01700 \text{ u}$  ;  $m({}^4_2\text{He}) = 4,00388 \text{ u}$  ;  $m({}^1_0\text{n}) = 1,0087 \text{ u}$  ;  $m({}^1_1\text{p}) = 1,0073 \text{ u}$  ;  $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$  ;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Sol.: a)  $\Delta m = 0,02812 \text{ u}$ ; b)  $E = 7,151 \cdot 10^{12} \text{ J}$ .

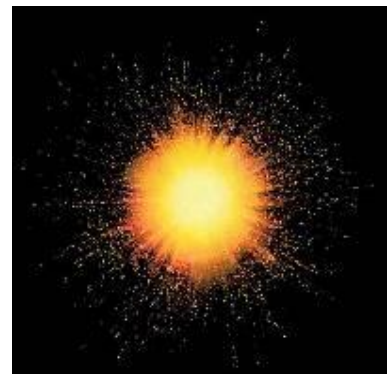
## 6 LA FUSIÓN NUCLEAR EN LAS ESTRELLAS.

La generación de los elementos químicos que existen en el universo se explica mediante las reacciones nucleares que ocurren en el cosmos. Hay tres procesos que dieron o dan lugar actualmente a la formación de elementos químicos.

- **Nucleosíntesis debido al big bang.**

Cuando se inició el universo hace 15000 millones de años, éste estaba formado por partículas elementales concentradas en una bola de fuego de extraordinaria temperatura y densidad. Tras la explosión de ésta, se comenzaron a formar los primeros elementos químicos (principalmente He-3, y en mucha menor cantidad H-2, He-3 y Li7).

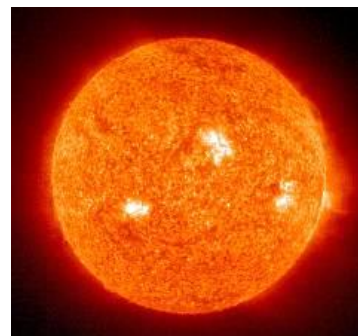
Sin embargo la expansión del universo tras la explosión provocó que en poco tiempo (unos tres minutos) el universo se expandiese lo suficiente para que la temperatura bajase hasta un nivel que hizo cesar la nucleosíntesis. Los neutrones que aún no habían reaccionado se desintegraron en protones y electrones, lo que explica la gran cantidad de hidrógeno presente en el universo.



**- Nucleosíntesis estelar.**

Si no hubiese sido por la formación de las estrellas, la síntesis de elementos se hubiese detenido después de los tres primeros minutos de vida del universo, pero la formación de grandes concentraciones de materia gracias a la gravedad permitió que se generasen las primeras galaxias y estrellas.

Las estrellas, nacen de las nubes interestelares de gas y polvo que existen repartidas por todo el universo. Compuestas principalmente de hidrógeno, amoníaco, agua, acetileno, formalina, silicatos, carbono etc, poseen los componentes necesarios no solo para desarrollar una estrella (o cientos de miles), sino para desarrollar también masas planetarias.



En las estrellas se generan todos los elementos químicos más pesados que el hidrógeno.

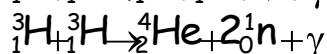
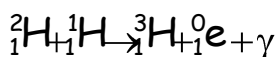
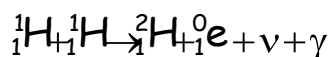
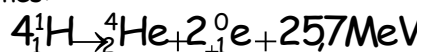
Cuando cerca de una nube de gas se produce la explosión de una supernova, la onda expansiva provoca que determinadas zonas de las nubes se contraigan y colapsen. En el proceso se desprende gran cantidad de energía gravitatoria que comienza a calentar la nube. Se ha formado una **protoestrella**.

El proceso continúa hasta que el centro de la nube se calienta tanto, que se alcanza la temperatura necesaria para que se inicien las reacciones nucleares. A partir de este momento, la presión generada por el gas caliente que tiende a expandirse, frena la fuerza gravitatoria que tiende a contraer la nube. La estrella se estabiliza y permanecerá así hasta que se agote su combustible nuclear.

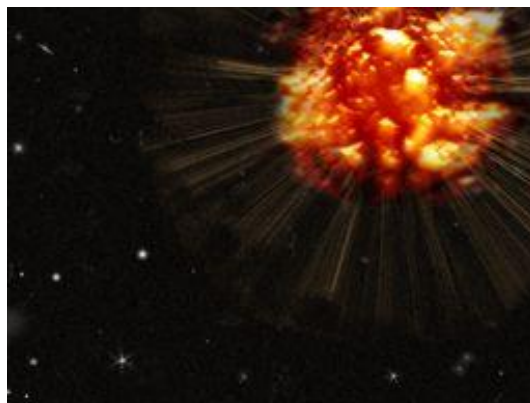
El tiempo que dure la estrella dependerá de su tamaño. Mientras más pequeña sea ésta, más lentamente podrá quemar su combustible nuclear para mantener controlado el colapso gravitatorio. Una estrella de tamaño medio-pequeño como el Sol, podrá durar 10000 millones de años. En cambio una estrella supergigante empleará entre 5 y 40 millones de años para agotar todo su hidrógeno (tiene que producir más energía para poder equilibrar la atracción gravitatoria).

En el núcleo de las estrellas, la temperatura es extrema. (Por ejemplo, en el Sol la temperatura es de unos 15.000.000 °C. Temperatura suficiente para que los protones puedan chocar entre sí formando núcleos de helio.

En las **estrellas de tipo medio** (en la secuencia principal), el helio se produce a partir de la siguiente secuencia de reacciones:



Cuando el hidrógeno se agota, la estrella utilizará el helio para sintetizar átomos más pesados. Sucesivamente se generarán elementos más pesados hasta llegar al hierro. A partir de aquí, la estrella no puede extraer más energía de los núcleos que la componen y el colapso es inminente. La estrella se derrumba sobre si misma y después estalla. El resultado final dependerá de la masa que posea la estrella en el momento de su colapso. (Enana blanca, estrella de neutrones o agujero negro).



Supernova

**- Nucleosíntesis producida en el medio interestelar mediante rayos cósmicos.**

Los rayos cósmicos producidos en las estrellas pueden provocar cambios nucleares al chocar con átomos presentes en los planetas o en las nubes de gas y polvo.

**EJERCICIOS DE SELECTIVIDAD PROPUESTOS EN ANDALUCÍA.**

**a. - Cuestiones.**

**27. - a.- Cuestiones.**

- a) ¿Qué cambios experimenta un núcleo atómico al emitir una partícula alfa? ¿Qué sucedería si un núcleo emitiera una partícula alfa y después dos partículas beta?
- b) ¿A qué se denomina período de semidesintegración de un elemento radiactivo? ¿Cómo cambiaría una muestra de un radionúclido transcurridos tres períodos de semidesintegración?

Razone las respuestas.

**28. - Conteste razonadamente a las siguientes cuestiones:**

- a) ¿Cuál es el origen de las partículas beta en una desintegración radiactiva, si en el núcleo sólo hay protones y neutrones?
- b) ¿Por qué la masa de un núcleo atómico es menor que la suma de las masas de las partículas que lo constituyen?

**29. - a) Describa las características de los procesos de emisión radiactiva alfa, beta y gamma.**

b) Uno de ellos consiste en la emisión de electrones. ¿Cómo es posible que un núcleo emita electrones? Razone su respuesta.

**30. - a) Dibuje de forma aproximada la gráfica que representa la energía de enlace por nucleón en función del número másico e indique qué puede deducirse de ella en relación con la estabilidad de los núcleos.**

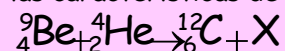
b) Razone, a partir de la gráfica, cuál de los dos procesos, la fusión o la fisión nucleares, proporciona mayor energía por nucleón.

**31. - a) Defina número másico, número atómico y masa atómica. ¿Cuál de ellos caracteriza a un elemento químico?**

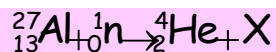
b) ¿Puede haber varios núcleos diferentes con el mismo número atómico y distinto número másico? ¿Y con el mismo número másico y distinto número atómico? Razone la respuesta y de algunos ejemplos.

**32. - a) La masa de un núcleo atómico no coincide con la suma de las masas de las partículas que lo constituyen. ¿Es mayor o menor? Justifique la respuesta.**

b) Complete las siguientes ecuaciones de reacciones nucleares, indicando en cada caso las características de X:







### b. - Problemas.

33. - a) Analice el origen de la energía liberada en una reacción nuclear de fisión.

b) En la reacción de fisión del  ${}_{92}^{235}\text{U}$ , éste captura un neutrón y se produce un isótopo del Kr, de número másico 92; un isótopo del Ba, cuyo número atómico es 56; y 3 neutrones. Escriba la reacción nuclear y determine razonadamente el número atómico del Kr y el número másico del Ba.

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

a) Indique el tipo de emisión radiactiva y escriba la correspondiente ecuación.

b) Calcule la energía liberada en el proceso.

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $m_{\text{Ra}} = 225,9771 \text{ u}$ ;  $m_{\text{Rn}} = 221,9703 \text{ u}$ ;  $m_{\text{He}} = 4,0026 \text{ u}$ ;  $1 \text{ u} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ .

35. - El  ${}_{94}^{237}\text{Pu}$  se desintegra, emitiendo partículas alfa, con un periodo de semidesintegración de 45,7 días.

a) Escriba la reacción de desintegración y determine razonadamente el número másico y el número atómico del elemento resultante.

b) Calcule el tiempo que debe transcurrir para que la actividad de una muestra de dicho núclido se reduzca a la octava parte.

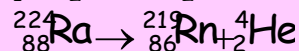
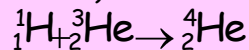
36. - El isótopo del hidrógeno denominado tritio ( ${}_{1}^3\text{H}$ ) es inestable ( $1/2 T = 12,5$  años)

y se desintegra con emisión de una partícula beta. Del análisis de una muestra tomada de una botella de agua mineral se obtiene que la actividad debida al tritio es el 92 % de la que presenta el agua en el manantial de origen.

a) Escriba la correspondiente reacción nuclear.

b) Determine el tiempo que lleva embotellada el agua de la muestra.

37. - a) Razone cuáles de las siguientes reacciones nucleares son posibles:



b) Deduzca el número de protones, neutrones y electrones que tiene un átomo de  ${}_{13}^{27}\text{Al}$ .

38. - En la bomba de hidrógeno se produce una reacción termonuclear en la que se forma helio a partir de deuterio y de tritio.

a) Escriba la reacción nuclear.

b) Calcule la energía liberada en la formación de un átomo de helio y la energía de enlace por nucleón del helio.

$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $m({}_{2}^4\text{He}) = 4,0026 \text{ u}$ ;  $m({}_{1}^3\text{H}) = 3,0170 \text{ u}$ ;  $m({}_{1}^2\text{H}) = 2,0141 \text{ u}$ ;  $m_{\text{p}} = 1,0078 \text{ u}$ ;  $m_{\text{n}} = 1,0086 \text{ u}$ ;  $1 \text{ u} = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

39. - a) Algunos átomos de nitrógeno ( ${}_{7}^{14}\text{N}$ ) atmosférico chocan con un neutrón y se transforman en carbono ( ${}_{6}^{14}\text{C}$ ) que, por emisión  $\beta$ , se convierte de nuevo en nitrógeno. Escriba las correspondientes reacciones nucleares.

b) Los restos de animales recientes contienen mayor proporción de  ${}_{6}^{14}\text{C}$  que los restos de animales antiguos. ¿A qué se debe este hecho y qué aplicación tiene?

40. - Una muestra de isótopo radiactivo recién obtenida tiene una actividad de  $84 \text{ s}^{-1}$  y, al cabo de 30 días, su actividad es de  $6 \text{ s}^{-1}$ .

a) Explique si los datos anteriores dependen del tamaño de la muestra.



a) Calcule la constante de desintegración y la fracción de núcleos que se han desintegrado después de 11 días.

41.- En una reacción nuclear se produce un defecto de masa de 0,2148 u por cada núcleo de  $^{235}\text{U}$  fisionado.

a) Calcule la energía liberada en la fisión de 23,5 g de  $^{235}\text{U}$ .

b) Si se producen  $10^{20}$  reacciones idénticas por minuto, ¿cuál será la potencia disponible?

$1\text{ u} = 1,67 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$  ;  $c = 3 \cdot 10^8\text{ m s}^{-1}$  ;  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}\text{ mol}^{-1}$

### EJERCICIOS DE REPASO (todos ' ).

1.- Calcule la energía de enlace del  $^{235}\text{U}$  así como la energía de enlace por nucleón, si  $m(^{235}\text{U}) = 235,124\text{ u}$ ;  $m(^1\text{H}) = 1,00759\text{ u}$ ;  $m_{\text{neutrón}} = 1,00898\text{ u}$ ;  $m_{\text{electrón}} = 0,00055\text{ u}$ ;  $1\text{ u} = 931\text{ MeV}$ . Sol.:  $E_e = 1777,28\text{ MeV}$ ;  $E_e/A = 7,56\text{ MeV/nucleón}$ .

2.- Una muestra de  $^{238}\text{U}$  tiene una actividad de  $8 \cdot 10^2\text{ mci}$  (milicurios); determina, sabiendo que su periodo de semidesintegración es de  $4,5 \cdot 10^9$  años.

a.- Su constante de semidesintegración.

b.- La masa de uranio de que se dispone en ese momento.

Datos: masa atómica del  $^{238}\text{U} = 238,051\text{ u}$ ;  $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}\text{ átomos/mol}$ .

Sol.:  $\lambda = 4,88 \cdot 10^{-18}\text{ s}^{-1}$ ; b)  $M = 2395,62\text{ kg}$ .

3.- Se tienen 100 g de una muestra radiactiva cuya velocidad de desintegración es tal que, en un día, se ha transformado el 20 % de la masa original. Calcule:

a.- La constante de desintegración.

b.- El periodo.

c.- La vida media.

d.- El descenso de su actividad hasta ese momento.

e.- La masa que quedará al cabo de 20 días.

Sol.: a)  $\lambda = 0,223\text{ día}^{-1}$ ; b)  $T = 3,11\text{ día}$ ; c)  $\tau = 4,48\text{ día}$ ; d) 20 %; e)  $m = 1,15\text{ g}$ .

4.- El periodo de un elemento radiactivo es de 28 años. ¿Cuánto tiempo tiene que transcurrir para que su cantidad se reduzca al 75 % de la muestra inicial?

Sol.: 11,62 años.

5.- El periodo de semidesintegración del  $^{14}_6\text{C}$  es de 5730 años. Calcule:

a.- Constante de desintegración radiactiva.

b.- Masa de una muestra que tenga una actividad de 1 curio.

Datos:  $m(^{14}_6\text{C}) = 14,0077\text{ u}$ ;  $1\text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$ ;  $1\text{ curio} = 3,7 \cdot 10^{10}\text{ desintegraciones} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}\text{ átomos/mol}$

Sol.: a)  $\lambda = 1,209 \cdot 10^{-4}\text{ año}^{-1}$ ; b)  $m = 7,12\text{ ng}$ .

6.- El periodo de semidesintegración de un núcleo radiactivo es de 100 s. Una muestra que inicialmente contenía  $10^9$  núcleos posee en la actualidad  $10^7$  núcleos. Calcule:

a.- La antigüedad de la muestra.

b.- La vida media.

c.- La actividad de la muestra dentro de 1000 s.

Sol.: a) 664,5 s; b)  $\tau = 144,27\text{ s}$ ; c)  $67,78\text{ desintegraciones} \cdot \text{s}^{-1}$ .

7.- En una muestra de  $^{51}\text{Cr}$  existen  $4,1 \cdot 10^{20}$  átomos. Si el periodo de semidesintegración del citado elemento es de 27 días, calcule:

a.- Vida media del emisor radiactivo.

b.- Número de átomos que habrá al cabo de un año y actividad de la muestra en ese momento.

Sol.:  $\tau = 38,95\text{ días}$ ;  $N = 3,49 \cdot 10^{16}\text{ átomos}$ .

8.- Si inicialmente tenemos 1 mol de átomos de radio, ¿cuántos átomos se habrán desintegrado en

1995 años?

Datos: El periodo de semidesintegración del radio es de 1840 años. El número de Avogadro vale  $6,023 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ .

Sol.:  $3,1823 \cdot 10^{23}$  átomos.

9.- La actividad de un elemento radiactivo pasa a valer 1/32 de su valor inicial cuando han transcurrido 45 s. ¿Cuál es su periodo de semidesintegración? Sol.: 9 s.

10.- El periodo de semidesintegración del  $^{14}\text{C}$  es de 5730 años. El análisis de una muestra de una momia egipcia revela que presenta las tres cuartas partes de la radiactividad de un ser vivo. ¿Cuál es la edad de la momia? Sol.: 2379 años.

11.- Sabiendo que el periodo de semidesintegración del  $^{210}_{84}\text{Po}$  es de 138 días, determina cuántos átomos de un mol de polonio se desintegran cada día. Sol.:  $3 \cdot 10^{21}$  átomos/día.

12.- Determina la edad de un mineral de uranio, sabiendo que en él por cada kg de  $^{238}_{92}\text{U}$  existen 320 g de  $^{206}_{82}\text{Pb}$ . (se ha de tener en cuenta que todo el  $^{206}\text{Pb}$  proviene de la desintegración del  $^{238}\text{U}$ , cuyo periodo de semidesintegración es  $T = 4,5 \cdot 10^9$  años).

Sol.:  $2,04 \cdot 10^9$  años.

13.- Determina el valor de la constante radiactiva del radón, sabiendo que la cantidad de átomos de este elemento disminuye en un 16,6 % en un día. Sol.:  $\lambda = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ .

14.- En 1898 Marie y Pierre Curie aislaron 200 mg de radio. El periodo de semidesintegración del radio es 1620 años. ¿A qué cantidad de radio han quedado reducidos un siglo más tarde los 200 mg aislados entonces? Sol.: 192,4 mg.

15.- La vida media del  $^{232}\text{Th}$  es de 24 días. ¿Qué cantidad de torio permanecerá sin desintegrarse al cabo de 96 días? Sol.: 1,83 %.

16.- El periodo de un elemento radiactivo es de 28 años. ¿Cuánto tiempo tiene que transcurrir para que su cantidad se reduzca al 75 % de la muestra inicial? Sol.: 11,62 años.

17.- En el curso de unas excavaciones se ha encontrado una estatua de madera cuya relación  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  es el 57,8 % de la que presentan las maderas actuales del lugar. Sabiendo que el periodo del  $^{14}\text{C}$  es de 5570 años, calcula la antigüedad de la estatua. Sol.: 4405 años.

18.- ¿Qué tanto por ciento de la masa inicial de un elemento determinado se ha desintegrado en un tiempo igual a tres periodos de semidesintegración? Sol.: 87,5 %.

19.- Un isótopo radiactivo artificial tiene un periodo de semidesintegración de 10 días. Se tiene una muestra de 25 mg de ese isótopo.

a.- Calcula la constante de semidesintegración.

b.- ¿Qué cantidad del mismo se tenía hace un mes? ¿Qué cantidad se tendrá dentro de un mes?

Dato:  $N_A = 6,023 \cdot 10^{23}$  átomos/mol.

Sol.: a.-)  $0,0693 \text{ días}^{-1}$ ; b.-) 200 mg, 3,13 mg.

20.- Una muestra radiactiva contiene  $10^{10}$  átomos y tiene una actividad de 10 desintegraciones por segundo. ¿Cuántos átomos habrá al cabo de un año?

Sol.:  $9,7 \cdot 10^9$  átomos.

21.- Si inicialmente tenemos un mol de átomos de radio, ¿cuántos átomos se habrán desintegrado en 1995 años? Datos: El periodo de semidesintegración del radio es de 1840 años. El número de Avogadro es  $6,023 \cdot 10^{23}$  átomos/mol. Sol.:  $3,18 \cdot 10^{23}$  átomos.

22.- Inicialmente teníamos  $6 \cdot 10^{23}$  núcleos de  $^{226}\text{Ra}$  que tiene un periodo de semidesintegración de 1600 años. ¿Cuántos se habrán desintegrado al cabo de 2000 años? Sol.:  $3,48 \cdot 10^{23}$  núcleos.

23.- La actividad de un elemento pasa a valer 1/1024 de su valor inicial al cabo de 280 s. Calcula el periodo de semidesintegración de este elemento. Sol.: 28 s.

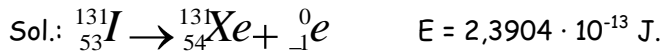
24.- ¿Cuántos periodos de semidesintegración son necesarios para que una sustancia radiactiva disminuya hasta quedar tan sólo una milésima del número de núcleos iniciales que tenía? Sol.: 10 periodos.

25.- El periodo de semidesintegración de una sustancia radiactiva es de 500 s. Si inicialmente

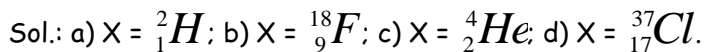
teníamos  $10^{12}$  núcleos y ahora nos quedan  $10^8$ , calcula la antigüedad de la muestra, es decir, el tiempo que ha transcurrido. Sol.: 1,85 h.

26.- En la serie del  ${}^{235}_{92}\text{U}$  cada átomo emite sucesivamente las siguientes partículas:  $\alpha, \beta, \alpha, \beta, \alpha, \alpha, \alpha, \beta, \beta, \alpha$ . De acuerdo con esa información confecciona la serie del U - 235.

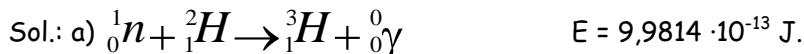
27.- El  ${}^{131}_{53}\text{I}$  se trata de un isótopo radiactivo muy peligroso. Escribe la reacción de desintegración por partícula beta. Esta radiación va acompañada de radiación gamma. ¿Cuál de las dos es más peligrosa? Calcula la energía total que se libera al desintegrarse el nucleido. Datos: masas: I - 131 = 130'8772 u; Xe - 131 = 130'8756 u; 1 u =  $1,66 \cdot 10^{-27}$  kg; c =  $3 \cdot 10^8$  m·s<sup>-1</sup>.



28.- Sustituye la X por el símbolo apropiado en las siguientes reacciones nucleares:  ${}^{10}_5\text{B}(X, \alpha){}^8_4\text{Be}$ ; b)  ${}^{17}_8\text{O}(D, n)X$ ; c)  ${}^{23}_{11}\text{Na}(p, X){}^{20}_{10}\text{Ne}$ ; d)  $X(p, n){}^{37}_{18}\text{Ar}$ . Ayúdate de la Tabla Periódica.



29.- Escribe la reacción nuclear y calcula la energía que se libera en el siguiente proceso: un neutrón incide sobre un núcleo de deuterio y se forma un núcleo de tritio, emitiéndose un fotón gamma. Datos: masas. Deuterio = 2'014740; neutrón = 1'008986, tritio = 3'017005; 1 u =  $1,66 \cdot 10^{-27}$  kg; c =  $3 \cdot 10^8$  m/s.



## RESUMEN DE LAS IDEAS MÁS IMPORTANTES.

**Partes del átomo:** núcleo: (protones y neutrones) y corteza: (electrones)

Nº Atómico (Z) = Nº protones      Nº de neutrones = N

Nº másico (A) = nucleones del núcleo (protones + neutrones)

### Tipos de núcleos.

**Isótopos.** Tienen igual Z y distinto A.

**Isótonos.** Tienen igual N y distinto Z.

**Isóbaros.** Tienen igual A pero distintos A y N.

### Masa del átomo.

Se mide en u.    1 u = 1/12 masa del átomo de carbono 12.    **1 u =  $1,66 \cdot 10^{-27}$  kg**

### Volumen del núcleo.

Es aproximadamente esférico. Volumen proporcional al número de nucleones.     **$R = r_0 \cdot A^{1/3}$ .**

El radio nuclear se mide en femtómetros o fermios (fm)    1 fm =  $1,2 \cdot 10^{-15}$  m.

### Estabilidad del núcleo.

Fuerzas nucleares muy intensas, de corto alcance (solo actúan en el núcleo), independientes de la carga eléctrica.

### Energía de enlace o de ligadura.

La masa de los núcleos es menor que la masa de los nucleones que lo forman --> Defecto de masa

( $\Delta m$ ) se calcula según:  $\Delta m = \sum m_{\text{nucleones}} - m_{\text{núcleo}}$

El defecto de masa se relaciona con energía de enlace mediante la expresión.  **$\Delta E = \Delta m \cdot c^2$**

A mayor defecto de masa, mayor es la energía liberada cuando se forma el núcleo.

### Energía de enlace por nucleón.

Dividiendo energía de enlace entre nº másico.  $E_n = \frac{\Delta E}{A}$

Se relaciona con la estabilidad del núcleo. A mayor valor, mas estable es el núcleo.

### Radiactividad.

Los átomos inestables se denominan radiactivos. Emiten partículas y ondas electromagnéticas. La radiactividad no depende de como esté combinado el átomo radiactivo con otros elementos.

Se emiten entre otros:

Emisión  $\alpha$ . Formadas por núcleos de átomos de Helio. ( ${}^4_2\text{He}$ )

Emisión  $\beta$ . Electrones ( ${}^0_{-1}\beta$ ) y positrones ( ${}^0_{+1}\beta$ ).

Emisión  $\gamma$ . Onda electromagnética de frecuencia muy elevada ( ${}^0_0\gamma$ ).

### Leyes de desintegración radiactiva.

#### Leyes del desplazamiento.

Si el núcleo emite partícula  $\alpha$ . El núcleo resultante tiene  $Z' = Z - 2$  y  $A' = A - 4$ .

Si el núcleo emite partícula  $\beta^-$ . El núcleo resultante tiene  $Z' = Z + 1$  y  $A' = A$ .

Si el núcleo emite partícula  $\beta^+$ . El núcleo resultante tiene  $Z' = Z - 1$  y  $A' = A$ .

Captura electrónica. El núcleo resultante tiene  $Z' = Z - 1$  y  $A' = A$ .

Emisión  $\gamma$ . El núcleo se desexcita. No sufre cambios en A ni en Z.

### Estadística desintegración radiactiva.

El proceso de desintegración es estadístico y es exponencial.

$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$  te permite conocer el número de núcleos presentes al pasar un tiempo t, conocido el número de núcleos iniciales  $N_0$  y la constante de desintegración radiactiva  $\lambda$ .

$A = \lambda \cdot N$  permite conocer la actividad (A) (desintegraciones por segundo). Se mide desintegraciones/s (Berquelio, Bq) y en Curio(Ci)  $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10}$  desintegraciones/s.

Se cumple que:  $A = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$

**Periodo de semidesintegración (T).** Tiempo que tarda una muestra radiactiva en reducirse a la mitad.

$$T = \frac{0,693}{\lambda}$$

**Vida media.** Tiempo que por término medio dura un átomo.  $\tau = \frac{1}{\lambda}$

### Reacciones nucleares.

Similares a las reacciones químicas pero entre núcleos. En ellas se debe conservar el N° atómico y el N° másico. Ej.  ${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0\text{n}$        ${}^9_4\text{Be}(\alpha, \text{n}) {}^{12}_6\text{C}$

Se pueden abreviar así:

**Núcleo reaccionante (partícula incidente, partícula emitida) núcleo obtenido**

### Fisión nuclear.

Consiste en romper núcleos pesados en dos más ligeros.

### Fusión nuclear.

Consiste en unir núcleos ligeros para obtener uno más pesado.