

## Tema 9: Física Nuclear

- 9.1 Introducción
- 9.2 Historia. Modelos atómicos
- 9.3 Interacciones Nucleares.
- 9.4 Estabilidad nuclear: Energía de enlace y defecto de masa.
- 9.5 Radiactividad: Leyes de las transformaciones radioactivas.
- 9.6 Reacciones de fusión y fisión nucleares.
- 9.7 Partículas Subatómicas.
- 9.8 Fuerzas Fundamentales.
- 9.9 Aplicaciones de la Radiactividad.
- 9.10 Inconvenientes de la Radiactividad
- 9.11 Ejercicios Resueltos.
- 9.12 Ejercicios Propuestos.

### 9.1.- Introducción

En 1895, el físico alemán W.K. Roentgen (1845-1923), en el transcurso de su estudio sobre descargas eléctricas en gases, descubrió la existencia de una radiación invisible muy penetrante que era capaz de ionizar el gas y provocar fluorescencia en él. Puesto que se desconocía el origen de esta radiación, le dio el nombre de rayos X.



En 1896 el físico francés A. H. Becquerel (1852-1908), observó que unas placas fotográficas que había guardado en un cajón envueltas en papel oscuro estaban veladas. En el mismo cajón había guardado un trozo de mineral de Uranio. Becquerel comprobó que lo sucedido se debía a que el Uranio emitía una radiación mucho más penetrante que los rayos X. Acababa de descubrir la radiactividad.








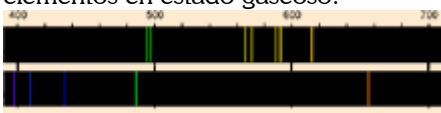

La **radiactividad** es la propiedad que presentan determinadas sustancias, llamadas sustancias radiactivas, de emitir radiaciones capaces de penetrar en cuerpo opacos, ionizar el aire, impresionar placas fotográficas y excitar la fluorescencia de ciertas sustancias.

### 9.2.- Historia: Modelos atómicos

Desde la Antigüedad, el ser humano se ha cuestionado de qué estaba hecha la materia. Unos 400 años antes de Cristo, el filósofo griego **Demócrito** consideró que la materia estaba constituida por pequeñísimas partículas que no podían ser divididas en otras más pequeñas. Por ello, llamó a estas partículas **átomos**, que en griego quiere decir "indivisible". Demócrito atribuyó a los átomos las cualidades de ser eternos, inmutables e indivisibles.

Sin embargo las ideas de Demócrito sobre la materia no fueron aceptadas por los filósofos de su época y hubieron de transcurrir cerca de 2200 años para que la idea de los átomos fuera tomada de nuevo en consideración.

| Año  | Científico   | Descubrimientos experimentales  | Modelo atómico  |
|------|--|---|---|
| 1808 | <br><a href="#">John Dalton</a> | Durante el s.XVIII y principios del XIX algunos científicos habían investigado distintos aspectos de las reacciones químicas, obteniendo las llamadas <b>leyes clásicas de la Química</b> . | La imagen del átomo expuesta por Dalton en su <a href="#">teoría atómica</a> , para explicar estas leyes, es la de minúsculas partículas esféricas, indivisibles e inmutables, iguales entre sí en cada elemento químico.  |

|      |  |   |  |
|------|--|---|--|
| 1897 | <br><a href="#">J.J. Thomson</a>  | Demostró que dentro de los átomos hay unas partículas diminutas, con carga eléctrica negativa, a las que se llamó <b>electrones</b> .<br>          | De este descubrimiento dedujo que el átomo debía de ser una esfera de materia cargada positivamente, en cuyo interior estaban incrustados los electrones.<br>( <a href="#">Modelo atómico de Thomson.</a> )<br> |
| 1911 | <br><a href="#">E. Rutherford</a> | Demostró que los átomos no eran macizos, como se creía, sino que están vacíos en su mayor parte y en su centro hay un diminuto <b>núcleo</b> .<br> | Dedujo que el átomo debía estar formado por una corteza con los electrones girando alrededor de un núcleo central cargado positivamente.<br>( <a href="#">Modelo atómico de Rutherford.</a> )<br>               |
| 1913 | <br><a href="#">Niels Bohr</a>    | <b>Espectros atómicos</b> discontinuos originados por la radiación emitida por los átomos excitados de los elementos en estado gaseoso.<br>        | Propuso un nuevo modelo atómico, según el cual los electrones giran alrededor del núcleo en unos niveles bien definidos.<br>( <a href="#">Modelo atómico de Bohr.</a> )<br>                                     |

### 9.2.1.- Estructura del átomo: Partículas subatómicas

- ✓ **Corteza atómica:** Formada por **electrones** ( ${}_{-1}e^{-}$ )  $\begin{cases} m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \\ q_e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \end{cases}$ . Interviene en las reacciones químicas, radiación térmica, efecto fotoeléctrico...

- ✓ **Núcleo:** Formado por:

- **protones** ( ${}_{1}p^{+}$ )  $\begin{cases} m_{p^{+}} = 1,6725 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,0073 \text{ uma} \\ q_{p^{+}} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C} \end{cases}$
- **neutrones** ( ${}_{0}n$ )  $\begin{cases} m_n = 1,6748 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 1,0086 \text{ uma} \\ q_n = 0 \text{ C} \end{cases}$

#### Características del núcleo:

- Tamaño: Radio  $\sim 10^{-15} \text{ m}$  (1/100000 veces el tamaño del átomo);  $R = 1,4 \cdot 10^{-15} \cdot A^{1/3} \text{ (m)}$
- Densidad:  $d \sim 1,5 \cdot 10^{18} \text{ kg/m}^3$

**Número atómico** ( Z ): nº de protones. Caracteriza al elemento químico

**Número másico** ( A ): nº de nucleones = nº protones + nº neutrones ( $A = Z + N$ ). Indica la masa aproximada del núcleo, en uma.

#### Clasificación de los núcleos:

Se entiende por nucleido (o núclido) cada uno de los tipos de núcleo que podemos encontrar (tanto natural como artificial). Cada nucleido viene caracterizado por Z y A, y su representación es:



Según el valor que tomen Z y A tendremos:

- ❖ **Isótopos:**  $=Z, \neq A (\neq N)$ . Son átomos del mismo elemento, con diferente masa, ejemplo:  $\left\{ \begin{array}{l} {}^{12}_6\text{C} \\ {}^{14}_6\text{C} \end{array} \right.$
- ❖ **Isóbaros:**  $\neq Z, =A$ . Átomos de distinto elemento, ejemplo:  $\left\{ \begin{array}{l} {}^{60}_{30}\text{Zn} \\ {}^{60}_{29}\text{Cu} \end{array} \right.$
- ❖ **Isótonos:**  $=N$ . Átomos con mismo nº de neutrones, ejemplo:  $\left\{ \begin{array}{l} {}^{57}_{26}\text{Fe} \\ {}^{58}_{27}\text{Co} \end{array} \right.$
- ❖ **Isómeros:**  $=Z, =N, =A$ , pero las partículas están distribuidas de forma diferente ( $\neq$  energía)

### 9.3.- Interacciones Nucleares

A distancias muy pequeñas se perciben los efectos de un nuevo tipo de fuerzas, además de las fuerzas gravitatoria y electromagnética ya conocidas. Son las llamadas fuerzas nucleares, de muy corto alcance pero muy intensas.

#### 9.3.1.- Fuerza Nuclear Fuerte

La interacción nuclear fuerte fue propuesta por el físico japonés **Hideki Yukawa** en 1934 y es responsable de la cohesión del núcleo.

Las partículas nucleares (los protones en particular) pueden mantenerse dentro del núcleo a tan corta distancia unos de otros, gracias a la interacción nuclear fuerte, que vence, en esas distancias, a la repulsión eléctrica entre cargas del mismo signo.

Las características fundamentales de esta interacción son:

- Fuerza atractiva para distancias  $< 10^{-15}$  m, prácticamente nula para distancias mayores.
- Afecta a nucleones
- Muy corto alcance ( $\sim 10^{-15}$  m)
- La más fuerte de las interacciones de la naturaleza.
- Independiente de la carga.

#### 9.3.2.- Fuerza Nuclear Débil

Es la responsable de la desintegración  $\beta$  de los núcleos y se manifiesta sobre todo en partículas no sometidas a la acción de la fuerza nuclear fuerte.

Las características fundamentales de esta interacción son:

- Fuerza atractiva para distancias  $< 10^{-17}$  m, prácticamente nula para distancias mayores.
- Muy corto alcance ( $\sim 10^{-17}$  m)
- A distancias muy cortas, donde es máxima, supera en intensidad a la fuerza gravitatoria, pero es más débil que la nuclear fuerte ( $10^{13}$  veces menos intensa) y la electromagnética.

Debido a la interacción fuerte, las energías de enlace de los núcleos son del orden de los MeV, muy grandes en comparación con los pocos eV de un electrón en un átomo. Esto nos marca una diferencia de energía entre los procesos químicos (a nivel atómico, con fuerza eléctrica) y los procesos nucleares (nivel nuclear, fuerza nuclear fuerte). (Nota: 1 eV (electrónvoltio): unidad de energía equivalente a  $1,6 \cdot 10^{-19}$  J. La energía de las partículas subatómicas se da en estas unidades y sus múltiplos: 1 keV =  $10^3$  eV, 1 MeV =  $10^6$  eV.)

### 9.4.- Estabilidad Nuclear. Energía de enlace

La respuesta al problema de la estabilidad nuclear se basa en la existencia de la interacción fuerte. Pero también podemos plantearnos la cuestión en términos de energía. Un núcleo es estable porque su energía es menor que la energía de las partículas por separado (su suma). Es decir, porque al formarse, ha desprendido energía. Y si queremos romper el núcleo, debemos darle dicha energía.

🍏 **Equivalencia masa-energía:** **Albert Einstein**, en 1905, como una de las consecuencias de su Teoría de la Relatividad, expuso que la masa de un cuerpo puede transformarse íntegramente en energía, y viceversa. La energía que puede extraerse de una masa dada  $m$  viene dada por la expresión  $E = mc^2$  donde la constante  $c$  coincide con la velocidad de la luz en el vacío. ( $c = 3 \cdot 10^8$  m/s)

Este principio de equivalencia tiene una consecuencia importante: en una reacción (sobre todo en reacciones nucleares) la masa no se conserva. Sí se conservará, en cambio, la energía total del sistema (teniendo en cuenta la energía equivalente a la masa).

🍏 **Defecto másico: Energía de enlace:** Cuando se forma un núcleo mediante la unión de los protones y neutrones que lo componen, se observa que la masa nuclear es menor que la suma de las masas de las partículas por separado. Es decir, se ha perdido masa en el proceso de formación (sin embargo, las partículas siguen siendo las mismas). A esa masa perdida se le denomina defecto másico ( $\Delta m$ ). Aunque sea una masa perdida, se considera su valor positivo. Se calcula con la expresión  $\Delta m = \sum m_{\text{Partículas}} - m_{\text{Núcleo}}$

¿Qué ha ocurrido con esta masa? Pues se ha transformado en energía, la cual es desprendida en forma de radiación. La cantidad de energía desprendida al formarse el núcleo a partir de sus partículas se denomina energía de enlace ( $E_e$ ), y se calcula mediante  $E_e = |\Delta m \cdot c^2|$

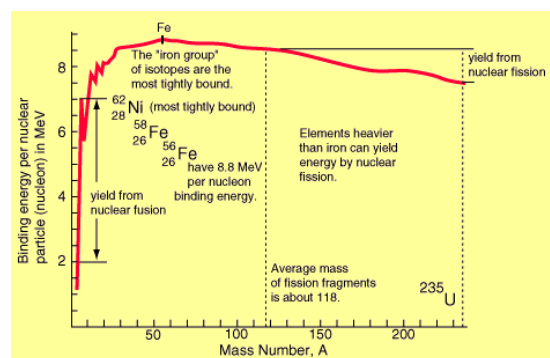
Si bien es una energía desprendida (correspondería que fuera negativa), se toma en valor absoluto.

También puede entenderse la energía de enlace como la energía que hay que suministrar al núcleo para descomponerlo en sus partículas. (Entonces cobra sentido el signo positivo).

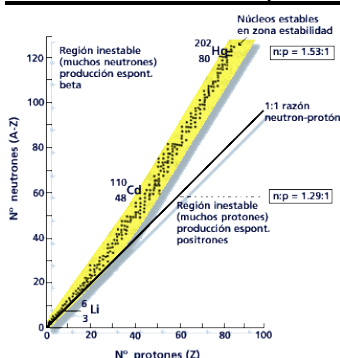
🍏 **Energía de enlace por nucleón (En):** Representa el promedio de energía desprendida por cada partícula que compone el núcleo.  $E_n = \frac{E_e}{A}$

Esta magnitud es la que nos indica la estabilidad de un núcleo. Cuanto mayor sea la energía desprendida por cada partícula, mayor estabilidad tendrá el núcleo. **A mayor energía de enlace por nucleón, mayor estabilidad.**

En la figura viene representada la energía de enlace por nucleón para los distintos nucleidos, en función del número de partículas ( $A$ , nº másico). Se observa que *crece al aumentar la masa atómica en los núcleos ligeros*, hasta llegar al Hierro (son estos los núcleos más estables). Sin embargo, *para los núcleos pesados decrece al aumentar la masa nuclear*. Esto tiene una consecuencia importante: Si unimos dos núcleos ligeros para formar uno más pesado (fusión nuclear), en el total del proceso se desprenderá energía. Y si rompemos un núcleo pesado en dos más ligeros (fisión nuclear) también se desprenderá energía. Los procesos contrarios no son viables energéticamente.



### 🍏 Núcleos estables y radiactivos: Relación N - Z:



Entre los nucleidos conocidos, unos son estables (no se descomponen en otros espontáneamente) y otros son inestables (o radiactivos), descomponiéndose, soltando partículas, y transformándose en otros nucleidos al cabo de un tiempo.

Representando los nucleidos en una gráfica Z - N (Figura 2), vemos que los nucleidos estables caen dentro de una zona que corresponde a  $Z = N$  para núcleos ligeros, y  $N \sim 1,5 \cdot Z$  para núcleos pesados. Los nucleidos inestables caen fuera de esta zona.

## 9.5.- Radiactividad. Leyes

Por radiactividad se entiende la emisión de radiación (partículas, luz) por parte de algunas sustancias, que se denominan radiactivas. Esta emisión puede ser espontánea (radiactividad natural), o producida por el hombre (radiactividad artificial).

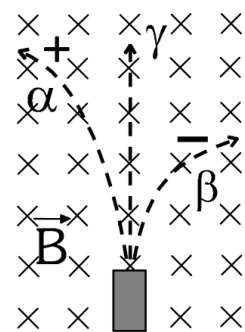
Este fenómeno puede ser observado por primera vez por el científico francés Henri Becquerel en 1896. Observó que unas sales de Uranio colocadas en su mesa de laboratorio ennegrecían las placas fotográficas que se encontraban dentro de uno de los cajones de la mesa. También Marie y Pierre Curie, en 1898, descubrieron nuevas sustancias que producían este efecto: el Polonio y el Radio. Posteriormente se han ido descubriendo más, hasta los aprox. 1300 nucleidos radiactivos conocidos actualmente.

La radiactividad es un fenómeno que ocurre a nivel del núcleo. Éste, ya sea de forma natural o forzada, emite partículas de su interior. Esto trae como consecuencia que el número de partículas del núcleo cambie (puede cambiar Z y A). Es decir, la sustancia inicial puede transformarse en otra sustancia totalmente diferente.

### 9.5.1.-Radiactividad Natural

Se conocen básicamente tres tipos de radiactividad natural, representadas con  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ . La primera diferencia notable entre ellas es la carga eléctrica. Los científicos **Soddy** y **Fajans**, en 1913, llegaron a las siguientes leyes de desplazamiento:

- 1- Cuando un núcleo emite una partícula  $\alpha$ , se transforma en un núcleo del elemento situado dos lugares a la izquierda en la tabla periódica. Es decir, su  $n^\circ$  atómico disminuye en dos unidades.
- 2- Cuando un núcleo emite una partícula  $\beta$ , se transforma en un núcleo del elemento situado un lugar a la derecha en la tabla periódica. O sea, su  $n^\circ$  atómico aumenta una unidad.
- 3- Cuando un núcleo emite radiación  $\gamma$ , continúa siendo del mismo elemento químico.



Las sustancias radiactivas emiten tres tipos de radiaciones que son desviadas en forma distinta por un campo magnético.

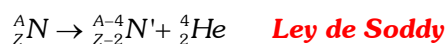
### 9.5.2.-Reacciones nucleares

**Reacciones Nucleares** son procesos en los que intervienen directamente los núcleos atómicos transformándose en otros distintos más estables (menos energéticos). En las que se libera energía.

#### Emisión de partículas $\alpha$ :

- ✓ Son núcleos de Helio formados por dos protones y dos neutrones.
- ✓ Su carga eléctrica es  $Q = +2e = +3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- ✓ Su masa es  $m = 6,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg} = 4,0026033 \text{ uma}$

Cuando una partícula  $\alpha$  abandona el núcleo N, su número másico disminuye en cuatro unidades y su número atómico en dos.



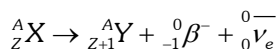
#### Emisión de partículas $\beta$ :

Un neutrón del núcleo se transforma en un electrón, (partícula  $\beta$ ), un protón y un antineutrino (partícula sin carga ni masa) mediante:  $n \rightarrow \beta^- + p^+ + \bar{\nu}_e$

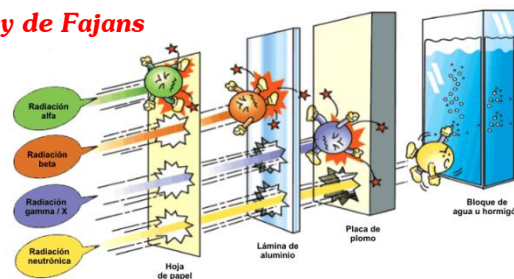
- ✓ Las partículas  $\beta$ , son electrones rápidos procedentes de neutrones que se desintegran dando lugar a un protón y un electrón.

- ✓ Su carga eléctrica es  $Q = -e = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- ✓ Su masa es  $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 0,000549 \text{ uma}$

Cuando una partícula  $\beta$  abandona el núcleo X, su número másico no se altera, mientras que su número atómico aumenta en una unidad.



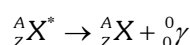
**Ley de Fajans**



### Emisión de partículas $\gamma$ :

- ✓ Son radiación electromagnética, es decir fotones.
- ✓ No tienen carga eléctrica.
- ✓ No tienen masa.

Cuando una partícula  $\gamma$  abandona el núcleo X, éste simplemente pierde energía. Sigue siendo un núcleo del mismo elemento químico.



La energía de los fotones liberados está relacionada con la frecuencia  $\nu$  de la radiación mediante la expresión  $E = h\nu$ , donde  $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ , es la constante de Planck.

Tras una desintegración, el núcleo hijo suele ser también inestable y sufrir una nueva desintegración dando lugar a otro núcleo distinto. En general, tienen lugar varias desintegraciones sucesivas hasta que el núcleo final sea estable. El conjunto de todos los isótopos que forman parte del proceso constituye una **serie** o **familia radiactiva**.

**Ejemplo 1:** En la desintegración radiactiva del Torio 232 se emite una partícula  $\alpha$  seguida de una  $\beta$ . Escribe las reacciones nucleares sucesivas que tienen lugar, sabiendo que el número atómico del Torio es 90.

En la emisión de la partícula  $\alpha$ , el número másico se reduce en cuatro unidades y el número atómico en dos.  ${}^{232}_{90} \text{Th} \rightarrow {}^{228}_{88} \text{Ra} + {}^4_2 \alpha$

En la emisión de la partícula  $\beta$ , el número másico no varía, pero el atómico aumenta a una unidad.  ${}^{228}_{88} \text{Ra} \rightarrow {}^{228}_{89} \text{Ac} + {}^0_{-1} \beta^-$

**Ejercicio 1.-** El uranio 238 captura un neutrón y emite dos partículas  $\beta$ . Escribe las reacciones nucleares que tienen lugar sabiendo que su número atómico es 92.

**Ejercicio 2.-** Determina el número atómico y el número másico del isótopo que resulta después de que un núcleo  ${}^{238}_{92} \text{U}$  emita sucesivamente dos partículas  $\alpha$  y tres  $\beta$ .

**Ejercicio 3.-** ¿En qué se transforma el núcleo del elemento químico  ${}^{214}_{83} \text{X}$  después de experimentar sucesivamente una emisión  $\alpha$ , tres  $\beta$  y una  $\gamma$ ?

En las reacciones nucleares se aplican las leyes de Soddy y Fajans, y las leyes de conservación de número másico y de la carga eléctrica. Así se establecen las ecuaciones que generalmente resuelven los problemas que se nos planteen.

**Ejemplo 2:** Si un núcleo de  ${}^6_3 \text{Li}$  reacciona con un núcleo de un determinado elemento X, se producen dos partículas  $\alpha$ . Escribe la reacción y determina el número atómico y el número másico del elemento X.

Las partículas  $\alpha$  son núcleos de He, cuyo número másico es 4 y con número atómico 2, por tanto, la reacción nuclear citada se puede representar mediante la ecuación:  ${}^6_3 \text{Li} + {}^A_Z \text{X} \rightarrow {}^4_2 \text{He} + {}^4_2 \text{He}$

De la conservación del número másico y la carga eléctrica se obtienen las ecuaciones: 
$$\begin{cases} 6 + A = 4 + 4 \\ 3 + Z = 2 + 2 \end{cases} \Rightarrow A = 2 \text{ y } Z = 1$$

por tanto, el elemento X debe tener un número másico  $A=2$  y un número atómico  $Z=1$ . Se trata del Deuterio  ${}^2_1 \text{H}$



### 9.5.3.- Ley de la Desintegración radiactiva

Cuando un núcleo atómico emite radiación  $\alpha, \beta$  ó  $\gamma$ , el núcleo cambia de estado o bien se transforma en otro distinto. En este último caso se dice que ha tenido lugar una desintegración.

Esta transformación no es instantánea, ya que no todas las desintegraciones se producen a la vez, sino que es un proceso aleatorio gobernado por leyes estadísticas, no sabemos en qué instante exacto se desintegrará un átomo en concreto. Pero, con mayor o menor rapidez, el número de átomos de la sustancia inicial va disminuyendo (y aumentando el de la sustancia final). La rapidez de esta disminución depende de dos factores:

- **Naturaleza de la sustancia:** Que viene marcada por la llamada constante de desintegración radiactiva ( $\lambda$ ), característica de cada isótopo radiactivo, y que se mide en  $s^{-1}$ .
- **Número de átomos que tengamos en cada instante:** N

Si llamamos N al número de núcleos que aún no se han desintegrado en un tiempo t, el número de emisiones por unidad de tiempo será proporcional al número de núcleos existentes:

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

El signo menos, indica que el número de núcleos disminuye con el tiempo. De la integración de esta expresión se obtiene la ley de emisión radiactiva. Esta ley nos da el número de núcleos N que aún no se han desintegrado en un instante de tiempo t:

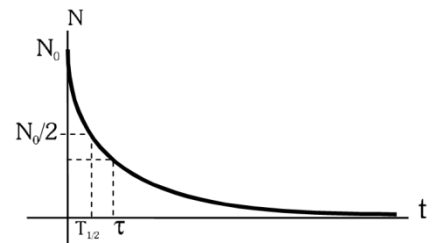
$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \Rightarrow \int \frac{dN}{N} = \int -\lambda dt \Rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \Rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Que es la expresión matemática de la Ley de Elster y Geitel, y donde  $N_0$  es el número de núcleos sin desintegrar en el instante inicial.

La actividad de una sustancia radiactiva pura disminuye con el tiempo en forma exponencial (Ley de Elster y Geitel)

El número de emisiones de una sustancia por unidad de tiempo,  $\frac{dN}{dt}$ , se denomina **actividad**, A, o velocidad de desintegración, e indica la rapidez con que se desintegra la sustancia (es decir, el número de desintegraciones por segundo que ocurren en un instante).

La actividad se mide, en el S.I., en desintegraciones/s (bequerel, Bq) aunque también se utiliza otra unidad en honor a Marie Curie, que es el curie (Ci)  $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ .



Se trata por tanto de una disminución exponencial. Inicialmente cuando el número de átomos es elevado, mayor será el número de desintegraciones, con lo que el decrecimiento es rápido. A medida que N va disminuyendo, hay menos probabilidad de que un átomo concreto se desintegre, con lo que el ritmo de desintegración disminuye y la pendiente se va haciendo cada vez menor. Lógicamente, a medida que N de la sustancia inicial disminuye, aumenta (al mismo ritmo) la cantidad de la sustancia final.

De la ecuación anterior, podemos deducir:  $A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N \Rightarrow A = A_0 e^{-\lambda t}$

El tiempo necesario para que se desintegre la mitad de los núcleos iniciales  $N_0$  recibe el nombre de **periodo de semidesintegración**, T, o también **semivida**. Su expresión se deduce de la Ley de emisión radiactiva:

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

La **vida media**,  $\tau$ , de un isótopo radiactivo es el tiempo medio que tarda en desintegrarse un núcleo al azar.

$\tau = \frac{1}{\lambda}$ , según esto, la ley de desintegración radioactiva podría expresarse mediante:

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

Hay que tener en cuenta que, si al cabo de T, la muestra de átomos original se ha reducido a la mitad, al cabo de otro tiempo T, no se habrán transformado la otra mitad, sino la cuarta parte (la mitad de la mitad); y en el siguiente periodo la octava... y así, en teoría, hasta el infinito. Siempre tendremos, en teoría, átomos originales sin desintegrar. En la práctica, consideramos que la muestra se ha desintegrado casi en su totalidad cuando ha transcurrido un tiempo suficiente como para que las desintegraciones apenas sean medibles.

Una sustancia radiactiva se dice **estable** cuando su vida media es mayor que la edad del universo (unos 13800 millones de años).

**Ejemplo 3:** El número de núcleos radiactivos de una muestra se reduce a tres cuartas partes de su valor inicial en 38h. Hallar:

a) La constante radiactiva; b) El periodo de semidesintegración.

a) Para hallar la constante radiactiva, sustituimos los datos del enunciado en la Ley de Elster y Geitel:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \Rightarrow \frac{3}{4} N_0 = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot 136800s}, \text{ aplicando logaritmos, tenemos: } \ln \frac{3}{4} = -\lambda \cdot 136800 \Rightarrow \lambda = \frac{\ln \frac{3}{4}}{136800} = 2,1 \cdot 10^{-6} Bq$$

b) calculamos el periodo de desintegración haciendo:  $T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{\ln 2}{6,1 \cdot 10^{-6} s^{-1}} = 330070s = 3,82 \text{ días}$

### 9.5.4.- Familias Radiactivas

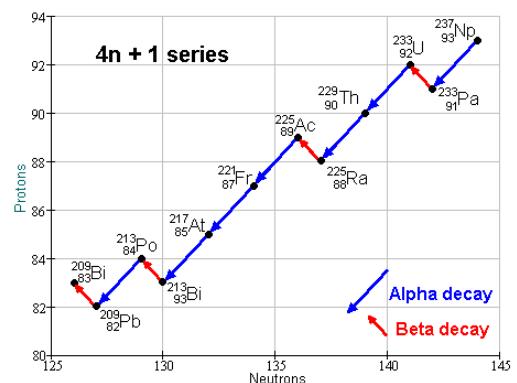
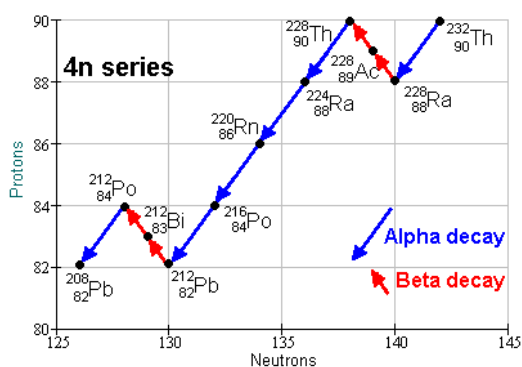
Como hemos visto con anterioridad, los nucleidos radiactivos  $^{232}_{90}Th$ ,  $^{237}_{93}Np$ ,  $^{238}_{92}U$ ,  $^{235}_{92}U$ , no desprenden una única partícula hasta alcanzar la estabilidad (normalmente un isótopo del plomo), sino que van desprendiendo sucesivamente partículas  $\alpha$  y/o  $\beta$ , pasando la transformación por diferentes núcleos (entre 10 y 14) hasta llegar al plomo. A este conjunto de nucleidos intermedios es lo que hemos denominado familia radiactiva.

Para el torio,  $^{232}_{90}Th$ , su masa atómica es múltiplo de 4. Su serie radiactiva se denomina 4n. Todos los núcleos intermedios por los que pasa al ir soltando partículas  $\alpha$  y/o  $\beta$ , tienen igualmente masa atómica múltiplo de 4.

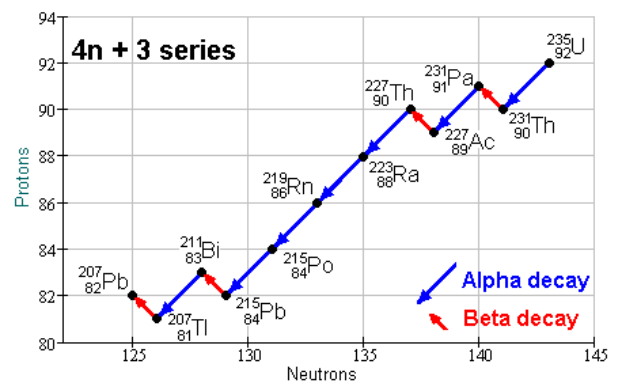
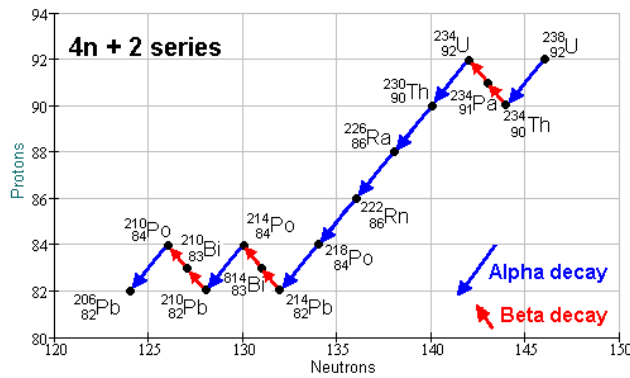
La serie del neptunio,  $^{237}_{93}Np$ , es 4n+1. La del  $^{238}_{92}U$ , 4n+2 ; y la del  $^{235}_{92}U$ , 4n+3.

La siguiente tabla resume los núcleos iniciales y finales de cada familia radiactiva.

| Familia               | A    | Núcleo Inicial  | periodo de semidesintegración (Años) | Núcleo Final    |
|-----------------------|------|-----------------|--------------------------------------|-----------------|
| Torio                 | 4n   | $^{232}_{90}Th$ | $1,4 \cdot 10^{10}$                  | $^{208}_{82}Pb$ |
| Neptunio (Artificial) | 4n+1 | $^{237}_{93}Np$ | $2,2 \cdot 10^6$                     | $^{209}_{83}Bi$ |
| Uranio – Radio        | 4n+2 | $^{238}_{92}U$  | $4,5 \cdot 10^9$                     | $^{206}_{82}Pb$ |
| Uranio - Actinio      | 4n+3 | $^{235}_{92}U$  | $7,2 \cdot 10^8$                     | $^{207}_{82}Pb$ |







## 9.6.- Fusión y Fisión Nuclear (Radiactividad Artificial)

Se pueden conseguir artificialmente transformaciones en los núcleos atómicos "bombardeándolos" con partículas ( $\alpha$ , p, n, etc). El núcleo absorbe (capta) dicha partícula y emite otras, transformándose así en otro elemento diferente (puede llegar incluso a romperse en varios núcleos más pequeños).

El estudio de estas reacciones lo inició **Rutherford** en 1919, al bombardear nitrógeno con partículas  $\alpha$ , y observar que aparecía oxígeno y se desprendían protones.

En 1934, el matrimonio **Joliot-Curie**, bombardeando boro con partículas  $\alpha$ , observaron que el elemento resultante, N-13, volvía a desintegrarse por sí solo, dando lugar a C-13. Habían conseguido fabricar un elemento radiactivo.

Actualmente se fabrican muchos isótopos radiactivos, con amplias utilidades en industria y medicina (radioterapia, tratamiento de cáncer).

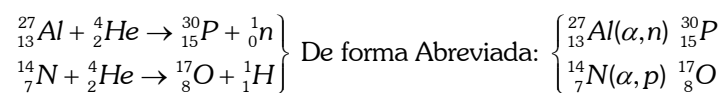
**En toda reacción nuclear se van a conservar (además de energía y cantidad de movimiento, como en toda colisión)**

- **La carga eléctrica total antes y después del choque**
- **El número total de nucleones ( $\Sigma A$ )**
- **La suma de los números atómicos ( $\Sigma Z$ )**

La masa, sin embargo, no se va a conservar, ya que parte de la masa se convierte en energía (defecto másico), ya sea en forma de fotones, o como energía cinética de las partículas resultantes.

### 9.6.1.- Representación de las reacciones nucleares

Se representan de forma similar a una reacción química, indicando los núcleos y partículas iniciales a la izquierda de la flecha, y las partículas resultantes a la derecha de la flecha. Por ejemplo:



Es posible que tengamos que ajustar la ecuación, es decir, que se produzca más de una partícula del mismo tipo.

Existen muchos tipos de reacciones nucleares (p, $\alpha$ ), (n,p), (p,n), (d,n), (d,2n), etc...

**⚡ Energía de la reacción ( $E_r$ ):** Es la energía que se absorbe o se desprende en la reacción nuclear. Se debe a la transformación de parte de la masa de las partículas en energía. Así, se calculará a través del defecto másico mediante la ecuación de Einstein:  $E_r = \Delta mc^2$  donde  $\Delta m = \sum m_{\text{productos}} - \sum m_{\text{Reactivos}}$  es

Las energías desprendidas en las reacciones nucleares son del orden de los MeV por cada núcleo que reacciona. Es una energía muy grande si la comparamos con la obtenida mediante reacciones químicas (del orden de eV por cada molécula que reacciona). También, para poder penetrar en el núcleo, la partícula que choque con él deberá tener una energía del mismo orden (MeV), sobre todo si tiene carga +. Estas grandes

energías no se consiguieron en los laboratorios hasta la invención de los aceleradores de partículas (hemos visto su funcionamiento en el tema de electromagnetismo).

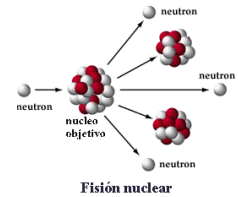
Para estudiar la viabilidad de una reacción nuclear, se usa la magnitud  $Q$  ( $Q = -E_r$ ). Así:

- ✓ Si  $Q > 0$  ( $E_r < 0$ ), la reacción es **exotérmica**, y se producirá naturalmente.
- ✓ Si  $Q < 0$  ( $E_r > 0$ ), la reacción es **endotérmica**, y no se producirá naturalmente. Habrá que suministrar por tanto energía a las partículas para que se dé la reacción

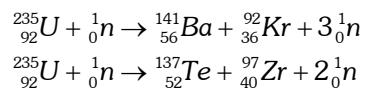
### 9.6.2.- Fisión Nuclear

Algunos núcleos atómicos pueden liberar gran cantidad de energía si se dividen para formar dos núcleos más ligeros. El proceso se denomina fisión nuclear.

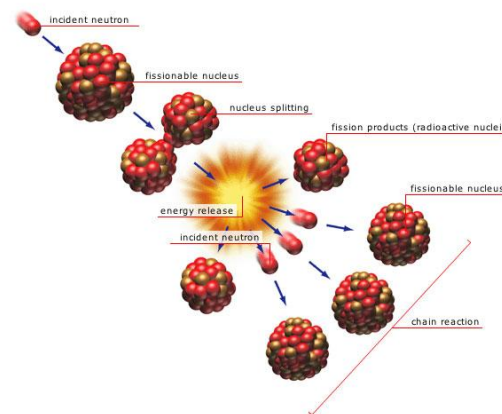
La **fisión nuclear** es una reacción nuclear en la que un núcleo pesado (más pesados que el Fe) se divide en otros dos más ligeros al ser bombardeado con neutrones. En el proceso se liberan más neutrones y gran cantidad de energía. Principalmente sufren este tipo de reacción nuclear el  ${}^{235}_{92}\text{U}$  y el  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$



Ejemplo de estas reacciones son:



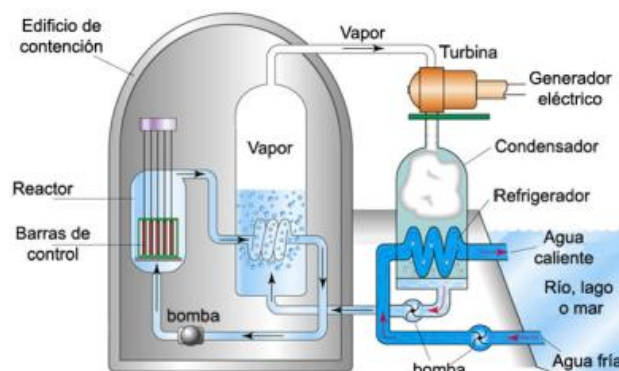
Que son reacciones que se producen en las centrales nucleares y en las que se llegan a desprender energías desprendidas del orden de 200 MeV por cada núcleo de uranio fisionado.



Como podemos observar, cada reacción desprende un mayor número de neutrones de los que absorbe. Estos neutrones podrán chocar con otros átomos de Uranio, volviéndose a producir la fisión, con desprendimiento de energía y más neutrones, y así sucesivamente. A esto se le denomina **reacción en cadena**. En las centrales nucleares, la reacción en cadena se controla mediante barras de control, de sustancias que absorben el exceso de neutrones (Cadmio principalmente). Si no se controla el número de neutrones, la energía desprendida es tan grande que se produce una explosión nuclear. Otro inconveniente es que los productos de la reacción son radiactivos, con vidas medias elevadas.

### 🍷 Centrales Nucleares de fisión:

En toda central de producción de energía eléctrica, esta se genera por inducción electromagnética (fenómeno estudiado en el tema de electromagnetismo), haciendo girar el rotor de una dinamo o alternador. La diferencia entre los diferentes tipos de central (térmica, hidroeléctrica, eólica, mareomotriz...) está en cómo se hace girar dicho rotor.



En una central nuclear, se aprovecha la energía desprendida en la fisión de  ${}^{235}_{92}\text{U}$  o  ${}^{239}_{94}\text{Pu}$ , para calentar agua, llevarla a la ebullición, y hacer que el vapor mueva una turbina, haciendo funcionar el alternador.

En la figura se observa el esquema básico de un tipo de central nuclear (con reactor de agua a presión).

En el núcleo del reactor, las barras de combustible (que contienen entre un 1% y un 4% de óxido de

uranio o plutonio), sufren la fisión, generando núcleos más ligeros y desprendiendo neutrones. Estos productos salen a gran velocidad, y son frenados al chocar con las moléculas de la sustancia moderadora que rodea las barras de combustible (*agua pesada D<sub>2</sub>O, normalmente*). Estos choques calientan el agua, y esta energía es la que se aprovecha para generar electricidad. Además, el moderador es necesario para que se produzca la reacción en cadena, ya que los neutrones producidos son demasiado rápidos, y deben frenarse para poder fisiónar los núcleos de uranio.

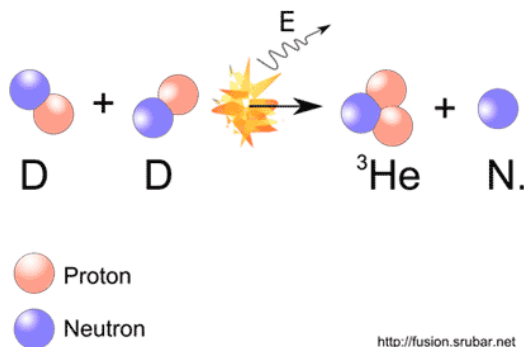
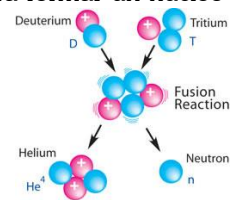
No es el agua del moderador la que entra en ebullición, ya que contiene sustancias radiactivas. La energía obtenida se va transmitiendo de un circuito cerrado de agua a otro (lo que se denomina intercambiador de calor). El vapor producido finalmente mueve la turbina, conectada a un generador de corriente alterna.

Las barras de control, de cadmio generalmente, son necesarias para mantener la reacción a ritmo adecuado. El Cadmio absorbe los neutrones en exceso, impidiendo que la reacción en cadena se des controle. Introduciendo o retirando barras se acelera, ralentiza o incluso se detiene la reacción.

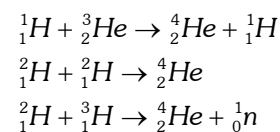
### 9.6.3.- Fusión Nuclear

Algunos núcleos atómicos pueden liberar gran cantidad de energía si se unen para formar un núcleo más pesado. El proceso se denomina fusión nuclear.

La **fusión nuclear** es una reacción en la que dos núcleos ligeros (menos pesados que el Fe) se unen para formar otro más pesado. En el proceso se libera gran cantidad de energía.



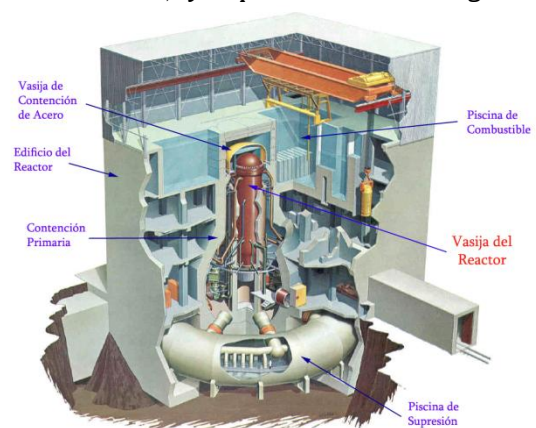
Las reacciones de fusión más comunes son:



La energía desprendida en estas reacciones es de aprox. 18 MeV, una cantidad menor que la producida en la fisión de un núcleo de Uranio. Pero en un gramo de Hidrógeno se producirá un mayor número de reacciones que en un gramo de Uranio, ya que tenemos mayor cantidad de átomos. En total, la energía obtenida por cada gramo que reacciona es unas 4 veces superior en el caso de la fusión. Además, el combustible es más barato (se encuentra en el agua), prácticamente inagotable, y no tiene residuos perjudiciales ni radiactivos.

Sin embargo, para conseguir que choquen los núcleos de Hidrógeno se necesita que tengan una gran energía cinética. Esto hace que el hidrógeno tenga que estar a gran temperatura (*aprox. cien millones de °C, en un estado de la materia conocido como plasma*). Ahí radica la dificultad. Es muy complicado mantener los núcleos a esa temperatura el tiempo necesario para que se produzca la fusión. Ahora bien, estas reacciones termonucleares se dan espontáneamente en el centro de las estrellas, ya que allí sí se consigue esa temperatura.

**Centrales nucleares de Fusión:** Aunque están todavía en fase experimental, los diferentes tipos que existen (tokamacs, stellarators, JET) consisten básicamente en este procedimiento. El combustible (hidrógeno) es calentado hasta estado de plasma (los átomos se desprenden de sus electrones, quedando con carga +), y es mantenido en movimiento mediante un campo magnético. Mediante un láser u otro procedimiento, se consigue la energía necesaria para que se produzca la fusión. Hasta ahora no se ha conseguido que la reacción se automantenga.



### 9.7.- Partículas Subatómicas

Como ya sabemos, el átomo se descompone en partículas más simples, o partículas subatómicas: los protones, los neutrones y los electrones. Además existen otras partículas subatómicas, de vida muy corta, procedentes de los choques que se producen en los aceleradores de partículas. La mayoría de estas están formadas por otras más simples denominadas partículas elementales, que no se pueden descomponer.

Actualmente se conocen centenares de partículas subatómicas, y todas ellas se clasifican en dos grupos, dependiendo de si están sometidas a interacción nuclear fuerte o no.

➤ **Quarks:** Sufren la interacción nuclear fuerte y son los constituyentes de protones y neutrones (formados por 3 quarks cada uno). Existen 6 tipos de quarks cuyas características son:

| Quark   | Símbolo  | Carga (e) | AntiQuark   | Símbolo   | Carga (e) | Espín | Masa GeV      |
|---------|----------|-----------|-------------|-----------|-----------|-------|---------------|
| Up      | <i>u</i> | 2/3       | AntiUp      | $\bar{u}$ | -2/3      | 1/2   | 0.029 – 0.037 |
| Down    | <i>d</i> | -1/3      | AntiDown    | $\bar{d}$ | 1/3       | -1/2  | 0.049-0.081   |
| Strange | <i>s</i> | -1/3      | AntiStrange | $\bar{s}$ | 1/3       | -1/2  | 0.103-0.125   |
| Charm   | <i>c</i> | 2/3       | AntiCharm   | $\bar{c}$ | -2/3      | 1/2   | 1.28-1.79     |
| Bottom  | <i>b</i> | -1/3      | AntiBottom  | $\bar{b}$ | 1/3       | -1/2  | 4.16-5.26     |
| Top     | <i>t</i> | 2/3       | AntiTop     | $\bar{t}$ | -2/3      | 1/2   | 170.1 – 180.1 |

- Son partículas con espín semientero.
- Interactúan con las cuatro fuerzas fundamentales.
- Sólo se encuentran en grupos (Mesones o Bariones), ligados por interacción fuerte.
- Para cada uno de ellos existe su partícula de antimateria (antiquark).

➤ **Leptones:** No sufren la interacción nuclear fuerte. Los electrones y neutrinos pertenecen a esta clase. Se conocen 6 tipos de leptones cuyas características son:

| Leptón               | Símbolo    | Carga (e) | Antileptón               | Símbolo          | Carga (e) | Masa GeV                   |
|----------------------|------------|-----------|--------------------------|------------------|-----------|----------------------------|
| Electrón             | <i>e</i>   | -1        | Positrón                 | $\bar{e}$        | 1         | 0.000548                   |
| Neutrino Electrónico | $\nu_e$    | 0         | Antineutrino Electrónico | $\bar{\nu}_e$    | 0         | $< 0.00022 \times 10^{-6}$ |
| Muón                 | $\mu$      | -1        | Antimuón                 | $\bar{\mu}$      | +1        | 0.105                      |
| Neutrino Muónico     | $\nu_\mu$  | 0         | Antineutrino Muónico     | $\bar{\nu}_\mu$  | 0         | $< 0.00017$                |
| Tau                  | $\tau$     | -1        | AntiTau                  | $\bar{\tau}$     | -1        | 1.776                      |
| Neutrino Tauónico    | $\nu_\tau$ | 0         | Antineutrino Tauónico    | $\bar{\nu}_\tau$ | 0         | $< 0.0155$                 |

- Son partículas de espín semientero 1/2.
- No se ven afectados por la interacción fuerte.
- Pueden vivir de manera aislada.
- Para cada uno de ellos existe su partícula de antimateria, es decir su antileptón.
- Las masas de los neutrinos no se han determinado con exactitud, sólo se conocen los límites superiores.

Los quarks y leptones se pueden dividir en tres familias o generaciones. Una generación se compone de un quark y un leptón de cada tipo de carga y, además, la generación 2 es más pesada que la uno y la generación 3 es más pesada que la uno y dos.

Toda la materia ordinaria o conocida está constituida por quarks y leptones de la primera generación, mientras que la materia desconocida se compone de la generación 2 y 3.

|                 | Primera Generación                | Segunda generación              | Tercera Generación                |
|-----------------|-----------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| Q U A R K S     | U<br>(up-arriba)                  | C<br>(charm-encanto)            | t<br>(top-cima)                   |
|                 | d<br>(down-abajo)                 | S<br>(strange-extraño)          | b<br>(botton-fondo)               |
|                 | e<br>(Electrón)                   | $\mu$<br>(Muón)                 | $\tau$<br>(taón)                  |
| L E P T O N E S | $\nu_e$<br>(Neutrino electrónico) | $\nu_\mu$<br>(Neutrino muónico) | $\nu_\tau$<br>(Neutrino tauónico) |

Cada partícula tiene asociada una antipartícula, esto es, otra partícula de igual masa y espín que la primera pero con carga y momento angular opuestos.

Cuando una partícula choca con su antipartícula, ambas se aniquilan, **aniquilación de pares**, y la masa total se transforma en energía. Existe también el fenómeno inverso; la **producción de pares**. Por ejemplo,

cuando un fotón de alta energía (1 MeV) choca con un núcleo, el fotón desaparece y se materializa un par electrón-positrón.

La antipartícula de electrón ( $e^-$ ) es el positrón ( $e^+$ ), la antipartícula del protón ( $p$ ) es el antiprotón ( $\bar{p}$ ) y la del neutrón ( $n$ ) el antineutrón ( $\bar{n}$ ).

**Ejemplo 4:** Halla la frecuencia mínima que debe tener un fotón para generar un par positrón-electrón sabiendo que la masa del electrón es de  $9,1 \cdot 10^{-31}$  kg y la constante de Planck  $6,62 \cdot 10^{-34}$  J·s.

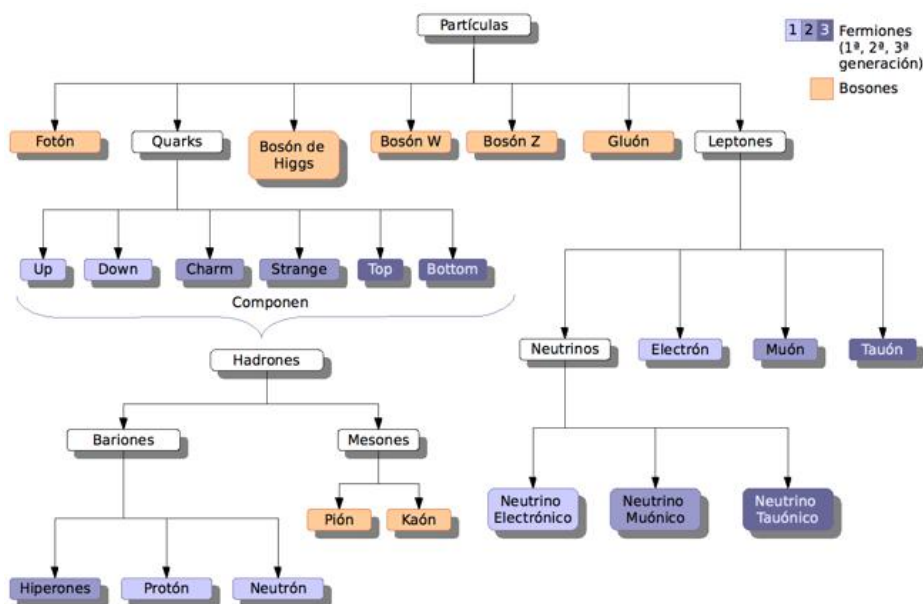
La energía mínima de un par electrón-positrón es la asociada a la masa de las dos partículas (si suponemos una energía cinética nula). Como ambos tienen la misma masa,  $m_e$ , ésta será:

$$E_{\min} = 2 \cdot m_e \cdot c^2 = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

Como  $E = h\nu$ , despejando la frecuencia, ésta será:

$$\nu_{\min} = \frac{E_{\min}}{h} = \frac{1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}}{6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J·s}} = 2,4 \cdot 10^{20} \text{ Hz}$$

### 9.7.1.- Cuadro resumen de las partículas subatómicas



### 9.8.- Fuerzas Fundamentales

Todas las fuerzas de la naturaleza pertenecen a alguno de estos cuatro grupos:

| Fuerza Gravitatoria   | Fuerza Electromagnética   |
|---|---|
| <p>Se ejerce entre dos partículas cualesquiera que tengan masa:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Siempre es atractiva</li> <li>• Es una interacción débil, solo es apreciable cuando uno de los cuerpos tiene gran masa, como un planeta o un astro.</li> </ul>   | <p>Se ejerce entre dos partículas con carga eléctrica:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Puede ser atractiva o repulsiva</li> <li>• Es de mayor intensidad que la gravitatoria y a distancias mayores de <math>10^{-15}</math> m puede superar a la nuclear fuerte.</li> </ul>   |
| Fuerza Nuclear Fuerte   | Fuerza Nuclear Débil  |
| <p>Es la responsable de la cohesión del núcleo: mantiene unidos a los nucleones.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Es una interacción muy intensa a distancias nucleares, superior al resto de las interacciones.</li> <li>• Es de corto alcance: prácticamente nula a distancias mayores de <math>10^{-15}</math> m.</li> </ul> | <p>Es la responsable de la desintegración <math>\beta</math> de algunos núcleos inestables.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Es más débil que la nuclear fuerte y la electromagnética, pero a distancias nucleares supera a la gravitatoria.</li> <li>• Es de corto alcance; prácticamente nula a distancias mayores de <math>10^{-17}</math> m.</li> </ul> |



Una teoría planteada inicialmente por Heisenberg y desarrollada posteriormente por varios científicos propone que estas interacciones se deben al intercambio de partículas. Por ejemplo, dos cargas eléctricas interactúan intercambiando fotones (que visto de otro modo son vibraciones del campo electromagnético). Surge así un nuevo grupo de partículas responsables de las interacciones. Algunas han sido observadas pero otras, aún no.

## 9.9.- Aplicaciones de la Radioactividad

### 9.9.1.- Aplicaciones de los Isótopos radioactivos

Los radioisótopos se comportan química y biológicamente igual que sus isótopos estables, entrando a formar parte en los mismos compuestos. Además, son fácilmente detectables, lo que permite seguirlos en cualquier proceso. Algunas de sus utilidades son:

- **Medicina:** Localización y tratamiento de tumores cancerosos, destrucción de tejidos malignos (son más sensibles a la radiación), estudio de circulación sanguínea, tratamiento de leucemia ( $^{32}\text{P}$ ), el estudio de órganos y la esterilización de material quirúrgico....
- **Biología:** Estudio de fotosíntesis ( $^{14}\text{C}$ ), Estudio de acción de antibióticos en el organismo (marcadores de azufre), Estudio de fijación de calcio en los huesos, Estudio de la migración de las aves, Producción de esterilidad en especies nocivas, plagas...
- **Química e Industria:** Análisis químico y de reacciones, Control de insecticidas y otros productos, Control de espesores y desgaste de planchas metálicas, paredes, etc.; Control de circulación de petróleo en oleoductos ( $^{140}\text{Ba}$ ), Control de movimientos de aire y agua en la atmósfera (trazadores), Determinación de edad de rocas y fósiles ( $^{14}\text{C}$ , método Libby-Arnold), ( $^{238}\text{U}$ ). Fabricación de relojes de precisión y generadores auxiliares para satélites...

#### 9.9.1.1.- Datación de fósiles

El carbono 14 es un isótopo radioactivo con un periodo de semidesintegración de 5730 años. Se origina en la atmósfera a partir del nitrógeno cuando inciden sobre él los neutrones procedentes de los rayos cósmicos. En cada especie, la proporción de los átomos de carbono 14 frente a la de carbono 12 es un valor constante (aproximadamente una parte entre un billón). Sin embargo, cuando un ser vivo muere, deja de incorporar carbono del exterior. Entonces la cantidad de carbono 14 de sus restos va disminuyendo a medida que se van desintegrando. De esta manera se puede conocer la edad de un fósil midiendo la proporción de carbono 14 que contiene. El potasio 40, que tienen un periodo de semidesintegración de 1310 millones de años, proporciona un método preciso si lo que queremos es datar fósiles muy antiguos.

### 9.9.2.- Obtención de Energía. Centrales Nucleares

Una central nuclear es una central termoeléctrica en la que actúa como caldera un reactor nuclear. La energía térmica se origina por las reacciones nucleares de fisión en el combustible nuclear formado por un compuesto de uranio. El combustible nuclear se encuentra en el interior de una vasija herméticamente cerrada, junto con un sistema de control de la reacción nuclear y un fluido refrigerante, constituyendo lo que se llama un reactor nuclear. El calor generado en el combustible del reactor y transmitido después a un refrigerante se emplea para producir vapor de agua, que acciona el conjunto turbina-alternador, generando la energía eléctrica.

En general transforman energía calorífica procedente de reacciones nucleares en energía mecánica que mueve un alternador y produce corriente eléctrica.

La producción de energía eléctrica nuclear en España durante 2010 fue de 61.914 GWh., lo que representó el 20,2% del total de la producción del sistema eléctrico nacional.



- Almaraz I
- Almaraz II
- Ascó I
- Ascó II
- Cofrentes
- Sta. M<sup>a</sup> de Garoña
- Trillo
- Vandellós II
- El Cabril
- Juzbado

Localización de las Centrales Nucleares en España



## 9.10.- Inconvenientes de la Radioactividad

### 9.10.1.- Sobre los seres vivos.

Durante millones de años, los seres vivos han soportado la radiactividad natural de la corteza terrestre y de los rayos cósmicos. Además, a partir del siglo XX la producción de rayos X y la radiactividad artificial han aumentado las radiaciones ionizantes.

La exposición a altas dosis de radiación aumenta la tasa de cáncer y puede producir otros trastornos de carácter genético. El grado de peligrosidad de un isótopo radioactivo depende del tipo de radiación ionizante que emita, de su energía y de su periodo de semidesintegración.

- Si la radiación se sitúa fuera del organismo, los rayos  $\gamma$  son la radiación más peligrosa, por ser la más penetrante. En cambio las partículas  $\alpha$  no penetrarán más allá de la piel.
- Si se sitúa dentro del organismo, las partículas  $\alpha$  son la radiación más peligrosa, por su corto alcance y su mayor masa.

Las radiaciones ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , X...), al incidir sobre la materia, pueden ionizarla, provocar reacciones, destruir moléculas, células, microorganismos.

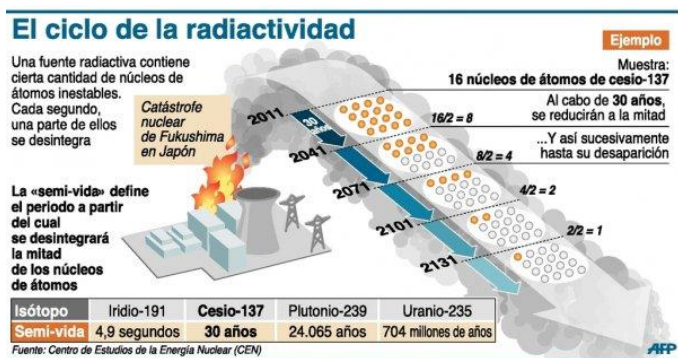
Afectan a las proteínas y bases nitrogenadas del ADN, produciendo alteraciones de funcionamiento, mutaciones, cáncer, destrucción celular, esterilidad...

Afectan a las células reproductoras, dando lugar a mutaciones hereditarias, alteración de la información genética, malformaciones congénitas...

### 9.10.2.- Inconvenientes de las Centrales Nucleares

Los residuos radiactivos de las centrales nucleares de fisión pueden producir los efectos antes citados. Además, tienen vidas medias en torno a varios cientos o miles de años, por lo que el riesgo de radiación se prolonga todo ese tiempo. Lo único que hasta ahora se puede hacer con ellos es almacenarlos en bidones de plomo forrados de hormigón y guardarlos en sitio seguro.

Además, existe el riesgo de un accidente en la central que provoque un mal funcionamiento del refrigerante o de las sustancias moderadores de neutrones, con lo que la reacción en cadena se descontrola y se produce la fusión del reactor. El peligro de esto no está tanto en la explosión (muy grave) como en la contaminación radiactiva del terreno, el agua, y el aire (nube radiactiva, que puede extenderse en un radio de miles de km), como ha ocurrido recientemente en la central de Fukushima en Japón.



Las centrales nucleares de fusión de hidrógeno, actualmente en proyecto, no tendrían los inconvenientes de las centrales de fisión (no producen residuos radiactivos, trabajan con menor cantidad de combustible, por lo que es menor el riesgo de explosión). Sin embargo, aún no resultan rentables.

## 9.11.- Ejercicios Resueltos

1.- Disponemos de una muestra de 3 mg de radio 226. Sabiendo que el radio 226 tiene un periodo de semidesintegración de 1600 años y una masa atómica de 226,025 u, calcula:

a) El tiempo necesario para que la muestra se reduzca a 1 mg.

Las masas  $m$  y  $m_0$  se relacionan con el número de núcleos en el instante  $t$  ( $N$ ) y en el instante inicial ( $N_0$ ):

$$m = \frac{N \cdot M}{N_A} \quad m_0 = \frac{N_0 \cdot M}{N_A}$$

Donde  $M$  es la masa molar y  $N_A$  el número de Avogadro.

De la ley de emisión radiactiva se deduce:

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

$$m = \frac{M}{N_A} N_0 \cdot e^{-\lambda t} = m_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Si despejamos el tiempo, tenemos:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \frac{m_0}{m}$$

Hallamos la constante radiactiva del radio  $^{226}\text{Ra}$ , y sustituimos los datos en la expresión de  $t$ :

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{0,693}{5,046 \cdot 10^{10} \text{ s}} = 1,37 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1} \Rightarrow t = \frac{1}{1,37 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}} \ln \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{ g}}{1 \cdot 10^{-3} \text{ g}} = 8,0 \cdot 10^{10} \text{ s}$$

*b) Los valores de la actividad inicial y de la actividad final.*

Calculamos el número de núcleos iniciales  $N_0$  y finales  $N$  mediante:

$$N_0 = \frac{m_0 \cdot N_A}{M} = \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{ g} \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{226,025 \text{ g}} = 7,99 \cdot 10^{18} \text{ núcleos} \quad N = \frac{m \cdot N_A}{M} = \frac{1 \cdot 10^{-3} \text{ g} \cdot 6,023 \cdot 10^{23}}{226,025 \text{ g}} = 2,66 \cdot 10^{18} \text{ núcleos}$$

Las actividades inicial y final vendrán dadas por:

$$A_0 = \lambda \cdot N_0 = 1,37 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1} \cdot 7,99 \cdot 10^{18} = 1,10 \cdot 10^8 \text{ Bq} \quad A = \lambda \cdot N = 1,37 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1} \cdot 2,66 \cdot 10^{18} = 3,65 \cdot 10^7 \text{ Bq}$$

*2.- Dada la reacción nuclear  $^6_3\text{Li} + ^1_0\text{n} \rightarrow ^3_1\text{H} + ^A_Z\text{X}$  determina:*

*a) El isótopo X a partir de sus números atómico y másico*

En toda reacción nuclear, la suma de los números atómicos y la suma de los números másicos se mantienen constantes; es decir:

$$\left. \begin{array}{l} 3 + 0 = 1 + Z \\ 6 + 1 = 3 + A \end{array} \right\} \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} Z = 2 \\ A = 4 \end{array} \right.$$

Así pues, el isótopo resultante es el Helio  $^4_2\text{He}$

*b) La masa atómica del isótopo X sabiendo que en esta reacción se libera una energía de 4,84 MeV por átomo de Litio-6. Masas atómicas: Litio-6: 6,0151 u; Tritio: 3,0160 u. Masa del neutrón: 1,0087 u*

Hallamos el valor del defecto de masa de la reacción a partir de la energía liberada:

$$\Delta m = 4,84 \text{ MeV} \cdot \frac{1 \text{ u}}{931 \text{ MeV}} = 0,0052 \text{ u}$$

Este defecto de masa es la diferencia entre la masa de los reactivos y de los productos:

$$\Delta m = [M(^6\text{Li}) + M_n] - [M(^3\text{H}) + M(^4\text{He})]$$

De donde despejando la masa atómica del helio obtenemos:

$$M(^4\text{He}) = [M(^6\text{Li}) + M_n] - [M(^3\text{H})] - \Delta m = 6,0151 \text{ u} + 1,0087 \text{ u} - 3,0160 \text{ u} - 0,0052 \text{ u} = 4,0026 \text{ u}$$

Por tanto:

$$M(^4\text{He}) = 4,0026 \text{ u}$$

3.- El  $^{210}_{84}\text{Po}$ , cuyo periodo de semidesintegración es de 140 días, se transforma, por emisión de partículas  $\alpha$  en el  $^{206}_{82}\text{Pb}$  estable. ¿Qué cantidad de Po-210 es necesario tener inicialmente para que al cabo de 560 días se puedan recoger 2,46 litros de helio, medidos a 27°C y 2 atm de presión?.

Determinemos en primer lugar el número de moles de Helio recogidos. Para ello aplicamos la ley de Clapeyron:

$$n = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} = \frac{2 \text{ atm} \cdot 2,46 \text{ l}}{0,082 \text{ atm} \cdot \text{l} \cdot \text{k}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot 300 \text{ K}} = 0,2 \text{ moles}$$

Este resultado indica que se han desintegrado 0,2 moles de Po-210. De acuerdo con la Ley de la desintegración radioactiva, como se han desintegrado 0,2 moles:

$$\Delta N = N_o - N_o \cdot e^{-\lambda t} \Rightarrow N_o = \frac{\Delta n}{1 - e^{-\lambda t}} = \frac{0,2}{1 - e^{-\lambda t}} = \frac{0,2}{1 - e^{-\frac{\ln 2}{140 \text{ días}} \cdot 560 \text{ días}}} = \frac{0,2}{1 - \frac{1}{16}} = \frac{16}{75} \text{ mol de Po-210}$$

Y por tanto, la masa de Po-210 será:

$$n = \frac{m}{M} \Rightarrow m = n \cdot M = \frac{16}{75} \text{ mol} \cdot 210 \text{ gr} \cdot \text{mol}^{-1} = 44,8 \text{ gr}$$

4.- El periodo de semidesintegración del  $^{226}\text{Ra}$  es de 1620 años. (AND-2006)

- Explique qué es la actividad y determine su valor para 1 g de  $^{226}\text{Ra}$ .
- Calcule el tiempo necesario para que la actividad de una muestra de  $^{226}\text{Ra}$  quede reducida a un dieciseisavo de su valor original.

Datos:  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$

a) Por actividad de una muestra radiactiva entendemos el número de desintegraciones que tienen lugar en la unidad de tiempo. Mide el ritmo de desintegración de la sustancia. En el S.I. se mide en Becquerel (Bq).

1 Bq = 1 desintegración por segundo.

La actividad depende del tipo de sustancia y de la cantidad (el nº de átomos) que tengamos en un instante determinado. Se calcula con la expresión:

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

Calculamos  $\lambda$ , la constante radiactiva del radio, a partir del periodo de semidesintegración:

$$T_{1/2} = 1620 \text{ años} = 5,1 \cdot 10^{10} \text{ s.}$$

$\lambda$  y  $T_{1/2}$  están relacionados a través de la vida media  $\tau$ .

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \quad T_{1/2} = \tau \cdot \ln 2$$

Por tanto:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = 1,36 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

Calculamos ahora N, el nº de átomos de Ra contenidos en 1 g. Como la masa atómica del  $^{226}\text{Ra}$  es de 226 u aproximadamente, un 1 mol de  $^{226}\text{Ra}$  tiene 226 g de masa. Así:

$$1\text{g } ^{226}\text{Ra} \cdot \frac{1\text{mol } ^{226}\text{Ra}}{226\text{g } ^{226}\text{Ra}} \cdot \frac{6,023 \cdot 10^{23} \text{ átomos } ^{226}\text{Ra}}{1\text{mol } ^{226}\text{Ra}} = 2,66 \cdot 10^{21} \text{ átomos } ^{226}\text{Ra}$$

Sustituyendo en la expresión de la actividad:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N = -3,62 \cdot 10^{12} \text{ Bq}$$

Es decir, la cantidad de  $^{226}\text{Ra}$  presente en la muestra se reduce actualmente a un ritmo de  $3,62 \cdot 10^{10}$  desintegraciones por segundo.

b) El periodo de semidesintegración,  $T_{1/2}$ , indica el tiempo que tarda una cierta cantidad de sustancia radiactiva en reducirse a la mitad, es decir el tiempo que transcurre hasta la desintegración de la mitad de núcleos que teníamos inicialmente. De este modo, al cabo de un periodo de semidesintegración, quedará la mitad de la muestra original, al cabo de dos veces el  $T_{1/2}$ , quedará la cuarta parte, al cabo de tres  $T_{1/2}$ , la octava parte, y quedará un dieciseisavo de la cantidad original transcurrido un tiempo igual a cuatro veces el periodo de semidesintegración.

Por lo tanto, el tiempo necesario que nos piden es de  $4 \cdot 1620 \text{ años} = 6480 \text{ años} = 2,04 \cdot 10^{11} \text{ s}$

5.- El  $^{226}_{88}\text{Ra}$  se desintegra radiactivamente para dar  $^{222}_{86}\text{Rn}$ . (AND-2005)

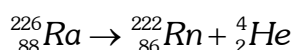
a) Indique el tipo de emisión radiactiva y escriba la correspondiente ecuación.

b) Calcule la energía liberada en el proceso.

Datos:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $m_{\text{Ra}} = 225,9771 \text{ u}$ ;  $m_{\text{Rn}} = 221,9703 \text{ u}$ ;  $m_{\text{He}} = 4,0026 \text{ u}$ .  $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

a) La radiactividad natural consiste en la emisión espontánea de partículas por parte de núcleos inestables, transformándose en otros nucleidos distintos. En este caso se trata de una emisión  $\alpha$ , ya que el nucleido inicial se transforma en otro con 2 unidades menos de número atómico y 4 unidades menos de número másico. El núcleo de radio ha desprendido una partícula  $\alpha$  ( $^4_2\text{He}$ ).

La reacción que tiene lugar es:



b) En el proceso de emisión radiactiva se libera energía debido a la pérdida de masa (defecto másico) que tiene lugar en la reacción. La masa total de los productos es menor que la masa del núcleo inicial. La cantidad de masa que se transforma en energía (energía liberada) se calcula mediante la relación de Einstein  $E = m \cdot c^2$ , donde c es la velocidad de la luz en el vacío.

En este caso la expresión queda:  $E_r = \Delta m \cdot c^2$

El defecto de masa es la diferencia entre la masa de los productos y de los reactivos:

$$\Delta m = \left[ M(^{222}_{86}\text{Rn}) + M(^4_2\text{He}) \right] - \left[ M(^{226}_{88}\text{Ra}) \right] = -0,042\text{u} = -7,014 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$$

Y la energía liberada:

$$E_r = \Delta m c^2 = -7,014 \cdot 10^{-30} \text{ kg} (3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2 = -6,31 \cdot 10^{-13} \text{ J} = -3,95 \text{ MeV}$$

Obtenemos una energía negativa, ya que es energía desprendida.

6.- 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.

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

a) Para ser exacto, la actividad de una muestra radiactiva no se mide en  $\text{s}^{-1}$  sino que se mide en desintegraciones por segundo o Bq. Por otra parte, cuando un núcleo atómico emite radiación  $\alpha, \beta$  ó  $\gamma$ , el núcleo cambia de estado o bien se transforma en otro distinto. En este último caso se dice que ha tenido lugar una desintegración.

Esta transformación no es instantánea, ya que no todas las desintegraciones se producen a la vez, sino que es un proceso aleatorio gobernado por leyes estadísticas, no sabemos en qué instante exacto se desintegrará un átomo en concreto. Pero, con mayor o menor rapidez, el número de átomos de la sustancia inicial va disminuyendo (y aumentando el de la sustancia final). La rapidez de esta disminución depende de dos factores:

- **Naturaleza de la sustancia:** Que viene marcada por la llamada constante de desintegración radiactiva ( $\lambda$ ), característica de cada isótopo radiactivo, y que se mide en  $\text{s}^{-1}$ .
- **Número de átomos que tengamos en cada instante:** N

Si llamamos N al número de núcleos que aún no se han desintegrado en un tiempo t, el número de emisiones por unidad de tiempo será proporcional al número de núcleos existentes:

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

El signo menos, indica que el número de núcleos disminuye con el tiempo. De la integración de esta expresión se obtiene la ley de emisión radiactiva. Esta ley nos da el número de núcleos N que aún no se han desintegrado en un instante de tiempo t.:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \Rightarrow \int \frac{dN}{N} = \int -\lambda dt \Rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \Rightarrow N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Que es la expresión matemática de la Ley de Elster y Geitel, y donde  $N_0$  es el número de núcleos sin desintegrar en el instante inicial.

Por tanto la actividad si depende del tamaño de la muestra.

b) La actividad de una sustancia viene dada por:  $A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N \Rightarrow A = A_0 e^{-\lambda t}$

así que con los datos del problema tenemos:

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

Si aplicamos logaritmos, nos queda:

$$\ln \left( \frac{A}{A_0} \right) = -\lambda t$$

Y despejando la constante de desintegración radiactiva llegamos a:

$$\lambda = \frac{-\ln \left( \frac{A}{A_0} \right)}{t} = \frac{-\ln \left( \frac{6}{84} \right)}{30 \text{ días}} = \frac{2,64}{30 \text{ días}} = 0,088 \text{ días}^{-1}$$

A los 11 días, tendremos que:  $N = N_0 e^{-\lambda t}$  de donde operando un poco obtenemos:

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} = e^{-0,088 \cdot 11} = 0,38$$

Trabajando con porcentajes, tenemos que a los 11 días queda sin desintegrar el 38% de la muestra, por tanto se ha desintegrado el 62 % de la muestra.

## 9.12.- Ejercicios Propuestos

### Problemas

1.- El Cloro tiene dos isótopos naturales. El 75,53% de los átomos es de  $^{35}_{17}\text{Cl}$ , cuya masa es de 34,96885 uma, y el 24,47% restante de  $^{37}_{17}\text{Cl}$ , de masa 36,96590 u. Calcular la masa atómica del Cloro.

**Solución:** 35,457 uma

2.- Determinar el defecto de masa y la energía de enlace por nucleón del isótopo  $^4_2\text{He}$ . [Datos:  $m(^4_2\text{He})$ : 4,0026033 u ;  $m(^1_1\text{H})$ : 1,00785252 u ;  $m(^1_0\text{n})$ : 1,0086654 u ]

**Solución:**  $\Delta m = -5,05 \cdot 10^{-29}$  kg ;  $E_n = 1,136 \cdot 10^{-12}$  J ( 7,1 MeV)

3. a) Indicar las partículas constituyentes de los dos nucleidos  $^3_1\text{H}$  y  $^3_2\text{He}$  y explicar qué tipo de emisión radiactiva permitiría pasar de uno a otro.

b) Calcular la energía de enlace para cada uno de los nucleidos e indicar cuál de ellos es más estable. ( $m_{\text{He-3}} = 3,016029$  u ;  $m_{\text{H-3}} = 3,016049$  u ;  $m_n = 1,0086$  u ;  $m_p = 1,0073$  u ;  $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27}$  kg ;  $c = 3 \cdot 10^8$  m s<sup>-1</sup>)

**Solución:** a) radiación  $\beta^-$  b)  $E_e(\text{H}) = 7,89$  MeV ;  $E_e(\text{He}) = 6,53$  MeV. Más estable H.

4.- Un gramo de carbón, al arder, produce 7 kcal. Calcular la cantidad de carbón necesaria para producir la misma energía que 1 kg de  $^{235}_{92}\text{U}$ , si la fisión de un núcleo de este elemento libera 200 Mev.

**Solución:**  $2,8 \cdot 10^6$  kg carbón.

5.- El  $^{238}_{92}\text{U}$  se desintegra emitiendo, sucesivamente, las siguientes partículas antes de alcanzar su forma estable:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $\alpha$ ,  $\alpha$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$ . ¿Cuál es el nucleido estable que se alcanza?

**Solución:**  $^{206}_{82}\text{Pb}$

6.- La vida media del  $^{14}_6\text{C}$  es 5730 años. ¿Qué fracción de una muestra de  $^{14}_6\text{C}$  permanecerá inalterada después de transcurrir un tiempo equivalente a cinco vidas medias?

**Solución:** 0,674 %

7.- El periodo de semidesintegración de  $^{51}_{25}\text{Cr}$  es de 27 días y, en un instante, tenemos  $4,13 \cdot 10^{21}$  átomos de ese elemento. Calcular: a) Vida media del emisor radiactivo. b) Número de átomos que quedará al cabo de un año.

**Solución:** a) 38,95 días ; b)  $3,52 \cdot 10^{17}$  átomos

8.- Se tienen 50 mg de  $^{131}_{53}\text{I}$ , cuya vida media es de 8 días. Calcular: a) Cantidad del isótopo que había hace un mes y cantidad que habrá dentro de dos meses. b) Periodo de semidesintegración. c) Actividad. ( $N_A = 6,023 \cdot 10^{26} = n^\circ$  de partículas que hay en 1 mol·kg) (considerar los meses de 30 días).

**Solución:** a) Hace 1 mes  $9,78 \cdot 10^{21}$  át., en 2 meses  $1,27 \cdot 10^{17}$  át.; b) 5,545 días; c)  $3,32 \cdot 10^{14}$  Bq.

9.- La vida media del  $^{234}_{90}\text{Th}$  es de 24 días. ¿Qué proporción de Torio permanecerá sin desintegrarse el cabo de 96 días?

**Solución:** 1,83 %



10.- La constante de desintegración radiactiva de una preparación es  $1,44 \cdot 10^{-3} \text{ h}^{-1}$ . ¿Cuánto tiempo tardará en desintegrarse el 75 % de la masa original?

Solución: 962,7 h.

11.- En una mezcla encontrada en la actualidad, de isótopos de U, el  $^{238}_{92}\text{U}$  representa el 99,3 % y el  $^{235}_{92}\text{U}$  el 0,7 %. Sus vidas medias son  $4,56 \cdot 10^9$  años y  $1,02 \cdot 10^9$  años respectivamente.

Calcular: a) Tiempo transcurrido desde que se formó la Tierra, si eran igualmente abundantes en ese momento. b) Actividad de 1 g. de  $^{238}_{92}\text{U}$

Solución: a)  $6,5 \cdot 10^9$  años ; b) 17593 Bq

12.- Formular la reacción  $^7\text{Li}(p, \gamma)^8\text{Be}$  y calcular la frecuencia de la radiación emitida.

Datos:  $m(^8\text{Be}) = 8,00777 \text{ u}$ ;  $m(^7\text{Li}) = 7,01818 \text{ u}$ ;  $m(^1\text{H}) = 1,00813 \text{ u}$ ;  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$

Solución:  $\nu = 4,18 \cdot 10^{21} \text{ Hz}$

13.- Una de las reacciones posibles de fusión del  $^{239}_{94}\text{Pu}$  cuando capta un neutrón es la formación de  $^{141}_{58}\text{Ce}$  y  $^{96}_{42}\text{Mo}$ , liberándose 3 neutrones. Formular la reacción y calcular la energía liberada por cada núcleo fisionado.

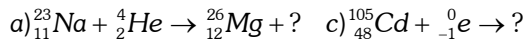
Datos:  $m(^{239}_{94}\text{Pu}) = 239,052158 \text{ u}$ ;  $m(^{141}_{58}\text{Ce}) = 140,908570 \text{ u}$ ;  $m(^{96}_{42}\text{Mo}) = 95,90499 \text{ u}$ ;  $m(^1_0\text{n}) = 1,008665 \text{ u}$ ;  $m(^0_{-1}\text{e}^-) = 0,000549 \text{ u}$

Solución:  $\Delta E = -18 \cdot 10^{-10} \text{ J}$  ( -737,5 MeV)

14.- En un proceso nuclear se bombardean núcleos de  $^7_3\text{Li}$  con protones, produciéndose dos partículas  $\alpha$ . Si la energía liberada en la reacción es exclusivamente cinética. ¿Qué energía cinética, en MeV, tendrá cada una de las partículas  $\alpha$ ? [ $m(^7_3\text{Li}) = 7,01818 \text{ u}$ ;  $m(^1_1\text{H}) = 1,00813 \text{ u}$ ;  $m(^4_2\text{He}) = 4,0026033 \text{ u}$ ]

Solución: 9,85 MeV

15.- Completar las siguientes reacciones nucleares:



16.- El Th  $^{234}_{90}\text{Th}$  se descompone según  $\alpha, \beta, \beta, \alpha, \alpha, \alpha, \beta, \alpha, \beta$ . Escribir todas las reacciones y decir cuál es el núcleo estable final.

Solución: Nucleido estable final  $^{210}_{82}\text{Pb}$

17.- El análisis de  $^{14}_6\text{C}$  de una momia egipcia revela que presenta 2/3 de la cantidad habitual en un ser vivo. ¿Cuándo murió el egipcio momificado? (T de semidesintegración = 3970 años)

Solución: Hace 2300 años aprox.

18.- Suponga una central nuclear en la que se produzca energía a partir de la siguiente reacción nuclear de fusión:  $4^4_2\text{He} \rightarrow ^{16}_8\text{O}$  a) Determine la energía que se produciría por cada kg de Helio que se fusionase.

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

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

Solución: a)  $8,657 \cdot 10^{13} \text{ J/kg}$  b) Mayor en el O.

19.- ¿En qué consiste el efecto fotoeléctrico? Aplicación práctica: ¿Cuál es la energía cinética máxima de los electrones arrancados del Bario cuando es iluminado con luz de longitud de onda de 350 nm? Función de trabajo del Bario 2,50 eV. Datos: Constante de Planck:  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ;  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ .

Solución:  $1,679 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

20.-Un láser de He-Ne emite luz monocromática, de longitud de onda  $\lambda = 633 \text{ nm}$ , con una potencia de 5 mW. Calcula la energía de cada fotón y el número de fotones emitidos por segundo.

21.- a) Explica por qué y cómo puede determinarse la edad de los restos de un organismo prehistórico por el "método del carbono-14".

b) Se observa que la actividad radiactiva de una muestra de madera prehistórica es diez veces inferior a la de una muestra de igual masa de madera moderna. Sabiendo que el periodo de semidesintegración del  $^{14}\text{C}$  es de 5600 años, calcula la antigüedad de la primera muestra.

Solución: 18603 años

22.- a) Explica las características de los principales tipos de radiactividad. b) Los dos primeros pasos de la cadena de desintegración de  $^{238}\text{U}$  son la primera una desintegración  $\alpha$  que da como resultado el Th y posteriormente una  $\beta$  que da como resultado Pa. Completar las ecuaciones de desintegración indicando el número atómico y másico del hijo y del nieto.

23.- El periodo de semidesintegración de un nucleido radiactivo de masa atómica 200 u, que emite partículas beta, es de 50 s. Una muestra, cuya masa inicial era 50 g, contiene en la actualidad 30 g del nucleido original. a) Indica las diferencias entre el nucleido original y el resultante y representa gráficamente la variación con el tiempo de la masa de nucleido original. b) Calcula la antigüedad de la muestra y su actividad.

Solución: a) 36,8 s; b)  $12,5 \cdot 10^{20}$  Bq

24.- Sobre un metal inciden fotones de longitud de onda  $\lambda = 500$  nm. Si la longitud de onda umbral correspondiente a dicho metal es de 612 nm, calcula: a) Si se extraen, o no, electrones. b) En su caso, la energía cinética de éstos. c) La energía de extracción en eV.

Solución: a) Si; b)  $7,29 \cdot 10^{-20}$  J; c) 2,03 eV

25.- Si el Bario tiene una función de trabajo de 2,48 eV, calcula la energía cinética máxima de los electrones que emitirá al ser iluminado con luz de longitud de onda de 480 nm. ¿Cuál es la velocidad de estos electrones?

Solución:  $1,96 \cdot 10^5$  m/s

26.- Una muestra radiactiva contenía hace 40 días  $10^9$  núcleos radiactivos y en la actualidad posee  $10^8$ . Calcula: a) La constante de desintegración. b) La vida media. c) La actividad de la muestra dentro de una semana.

Solución: a) 0,057564 días; b) 17,37 días $^{-1}$ ; c)  $3,85 \cdot 10^6$  Bq

27.- La función de trabajo de una superficie limpia de Na es 2,5 eV. a) Determina la frecuencia fotoeléctrica umbral. b) ¿Emite electrones la superficie al ser iluminada con luz de 550 nm? Razona la respuesta.

Solución: a)  $6,04 \cdot 10^{14}$  s $^{-1}$ ; b) No

28.- La masa del núcleo del isótopo del sodio  $^{23}\text{Na}$  es de 22,9898 uma. Calcula: a) El defecto de masa correspondiente. b) La energía media de enlace por nucleón. Datos: masa del protón = 1,0073 uma; masa del neutrón 1,0087 uma; 1 uma =  $1,66 \cdot 10^{-27}$  Kg; velocidad de la luz,  $c = 3 \cdot 10^8$  m·s $^{-1}$ .

Solución: a) -0,1949 uma; b)  $24 \cdot 10^{-28}$  kg; c)  $1,27 \cdot 10^{-12}$  J/nucleón

29.- El  $^{210}_{83}\text{Bi}$  emite una partícula  $\beta$  y se transforma en polonio, el cual emite una partícula  $\alpha$  y se transforma en un isótopo del plomo. a) Escribe las correspondientes reacciones de desintegración. b) Si el periodo de semidesintegración del  $^{210}_{83}\text{Bi}$  es de 5 días y se tiene inicialmente 1 mol de átomos de bismuto, ¿cuántos núcleos se han desintegrado en 10 días?

Solución:  $4,55 \cdot 10^{23}$  átomos

30.- El periodo de semidesintegración del radón-222 es de 3,825 días. a) ¿Qué porcentaje de muestra se desintegrará en un día? b) ¿Cuántos átomos se desintegrarán en un día si la muestra es de 1  $\mu\text{g}$ ? c) ¿Qué cantidad de muestra será necesaria para que tenga una actividad de 1 microcurio? Datos: (1 curio, Ci, equivale a  $3,7 \cdot 10^{10}$  desintegraciones/s)

Solución: a) 16,6%; b)  $4,51 \cdot 10^{14}$  átomos; c)  $1,76 \cdot 10^{10}$  átomos

31.- El radio-226 emite partículas  $\alpha$  transformándose en radón-222 gaseoso con un periodo de semidesintegración de 1.590 años. Determinar el volumen de gas, medido en condiciones normales, que se produce en un año a partir de 10 gramos de radio.

Solución: 0,43 cm<sup>3</sup>

32.- En un accidente nuclear se emiten diversos productos radiactivos. Dos de ellos son los isótopos <sup>131</sup>I y el <sup>137</sup>Cs, cuyos periodos de semidesintegración son 8 días y 30 años, respectivamente. Si la proporción de átomos de I a Cs es de 1/5, a) determinar el tiempo transcurrido para que ambos isótopos tengan la misma actividad. Sol: 65,2 días b) El 1 % de los productos de la fisión nuclear del <sup>235</sup>U es <sup>131</sup>I. Si en la fisión nuclear del uranio se desprenden 200 MeV y la potencia térmica del reactor tiene un valor de 1.000 MW, calcular la actividad del <sup>131</sup>I en el momento del accidente.

Solución: a) 65,2 días; b) 3,125.1017 desintegraciones/s

33.-Un reactor nuclear que utiliza como combustible uranio enriquecido, con un porcentaje de isótopo fisionable <sup>235</sup>U del 2,5 %, genera una potencia térmica de 500 megavatios. Si la energía de fisión del <sup>235</sup>U es de 200 MeV, determinar el consumo anual de combustible.

Solución: a) 192 kg de <sup>235</sup>U/año; 7680 kg de U/año

34.- Una hipotética central generadora de energía eléctrica que funcionara a partir de la reacción de fusión nuclear del deuterio en helio, y un rendimiento del 30% en la producción de energía eléctrica, ¿qué cantidad de combustible necesitaría para producir 10<sup>6</sup> kWh?. Datos: Masas atómicas: Deuterio=2,0147 uma; Helio=4,0039 uma.

Solución: 21,07 g

35.- Un núcleo tiene igual número de protones y neutrones y un radio igual a 2/3 del radio del núcleo del <sup>54</sup>V. Encontrar el núcleo de que se trata y determinar su energía de enlace.

Solución: <sup>16</sup>O, 127,6 MeV

36.- El <sup>226</sup>Ra se desintegra emitiendo radiación  $\alpha$ . Determinar la energía cinética máxima con que se emiten las partículas  $\alpha$  considerando inicialmente en reposo el átomo radiactivo. Datos: Masas atómicas: <sup>222</sup>Rn=221,9703 u; <sup>226</sup>Ra = 225,9771 u; <sup>4</sup>He = 4,0026u.

Solución: 3,84 MeV

37.- Dada la reacción:  ${}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^4_2\text{He}$ , Calcula:

- La energía liberada en el proceso.
- La energía media de enlace por nucleón del Li.

Datos de masas: <sup>7</sup>Li = 7,0166 u. <sup>4</sup>He = 4,0026 u. m<sub>protón</sub> = 1,0073 u. m<sub>neutrón</sub> = 1,0087 u.

Solución: a) 17,4 MeV; b) 5,3 MeV

38.- La reacción global de fusión que se produce en el Sol es:  $4 {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + 2 {}^0_1\beta + 25,7 \text{ MeV}$ , Sabiendo que radia 10<sup>34</sup> J/año, averigua cuánta masa pierde anualmente debido a este hecho.

Solución: 1,1.10<sup>17</sup> kg

39.- El periodo de semidesintegración del radón-222 es de 3,825 días.

- ¿Qué porcentaje de muestra se desintegrará en un día?
- ¿Cuántos átomos se desintegrarán en un día si la muestra es de 1  $\mu\text{g}$ ?
- ¿Qué cantidad de muestra será necesaria para que tenga una actividad de 1 microcurio?

Solución: a) 16,6% b) 4,51·10<sup>14</sup> átomos c) 1,76·10<sup>10</sup> átomos

40.- Mediante un contador Geiger se mide el número de desintegraciones por minuto de una fuente radiactiva de <sup>131</sup>I cada 4 días, obteniéndose la siguiente serie de medidas: 200, 141, 100, 71,... a) Calcular la constante de desintegración del isótopo <sup>131</sup>I. b) Calcular la vida media de este radioisótopo.

Solución: a) 10<sup>-6</sup> s<sup>-1</sup> b) 11,5 días

41.- Una fuente radiactiva de <sup>175</sup>Hf muestra una actividad de 42.000 desintegraciones por minuto. Treinta y cuatro días más tarde la actividad de la misma es de 30.000 y 40 días después de la primera medida, 28.270 desintegraciones por minuto. Determinar el periodo de semidesintegración y la constante de desintegración del <sup>175</sup>Hf.

Solución: 70 días; 9,9.10<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>

42.- El radio-226 emite partículas  $\alpha$  transformándose en radón-222 gaseoso con un periodo de semidesintegración de 1.590 años. Determinar el volumen de gas, medido en condiciones normales, que se produce en un año a partir de 10 gramos de radio.

Solución: 0,43 cm<sup>3</sup>

43.- En la reacción nuclear exotérmica:  $^{10}\text{B} + n \rightarrow ^7\text{Li} + ^4\text{He}$  determinar la energía con la que son emitidas las partículas  $\alpha$  si los neutrones tienen poca energía (neutrones térmicos) y se supone un choque elástico.

Datos: Masas atómicas:  $^{10}\text{B} = 10,0167 \text{ u}$ ;  $n = 1,00894 \text{ u}$ ;  $^7\text{Li} = 7,01869 \text{ u}$ ;  $^4\text{He} = 4,0026 \text{ u}$

Solución: 2,58 MeV

44.- Una muestra de  $^{131}\text{I}$  radiactivo, cuyo período de semidesintegración es de 8 días, que experimenta una desintegración  $\beta^-$ , tiene una actividad medida por un contador Geiger de 84 Bq. a) ¿Qué actividad registrará la muestra si se realiza la medida 32 días después? b) ¿Qué número de átomos de  $^{131}\text{I}$  hay inicialmente? c) Escribe la ecuación del proceso que tiene lugar y, para ello, consulta una tabla periódica de los elementos.

Solución: a) 5,24 Bq; b)  $3,75 \cdot 10^6$  átomos

45.- En un accidente nuclear se emiten diversos productos radiactivos. Dos de ellos son los isótopos  $^{131}\text{I}$  y el  $^{137}\text{Cs}$ , cuyos períodos de semidesintegración son 8 días y 30 años, respectivamente. Si la proporción de átomos de I a Cs es de 1/5, a) Determinar el tiempo transcurrido para que ambos isótopos tengan la misma actividad. b) El 1 % de los productos de la fisión nuclear del  $^{235}\text{U}$  es  $^{131}\text{I}$ . Si en la fisión nuclear del uranio se desprenden 200 MeV y la potencia térmica del reactor tiene un valor de 1.000 MW, calcular la actividad del  $^{131}\text{I}$  en el momento del accidente.

Solución: a) Sol: 65,2 días; b)  $3,125 \cdot 10^{17}$  desintegraciones/s

46.- Para determinar el volumen total de sangre de un enfermo, se le inyecta una pequeña cantidad de una disolución que contiene  $^{24}\text{Na}$ , cuya actividad es de 1.500 desintegraciones/s. Cinco horas después se toma muestra de la sangre y su actividad es 12 desintegraciones/min para 1 cm<sup>3</sup> de muestra. Hallar el volumen de sangre del enfermo. Dato período de semidesintegración del  $^{24}\text{Na} = 15$  horas

Solución: 5.950 cm<sup>3</sup>

47.- El potasio tiene un isótopo radiactivo,  $^{40}\text{K}$ , cuya abundancia relativa es del 0,011 %. Sabiendo que el cuerpo humano tiene un 1,2 % en peso de potasio y que el período de semidesintegración del citado isótopo es de  $1,3 \cdot 10^9$  años, determinar la actividad radiactiva de una persona de 80 kg debida a este isótopo.

Solución: 0,73  $\mu\text{Ci}$

48.- En la alta atmósfera, el  $^{14}\text{N}$  se transforma en  $^{14}\text{C}$  por efecto del bombardeo de neutrones. a) Escribe la ecuación de la reacción nuclear que tiene lugar. b) Si el  $^{14}\text{C}$  es radiactivo y se desintegra mediante  $\beta^-$ , ¿qué proceso tiene lugar? c) Las plantas vivas asimilan el carbono de la atmósfera mediante la fotosíntesis y a su muerte el proceso de asimilación se detiene. En una muestra de un bosque prehistórico se detecta que hay 197 desintegraciones/minuto, mientras que en una muestra de la misma masa de un bosque reciente existen 1350 desintegraciones/minuto. Calcula la edad del bosque prehistórico, sabiendo que el período de semidesintegración del  $^{14}\text{C}$  es de 5590 años.

Solución: 15.522 años

49.- El porcentaje de  $^{14}\text{C}$ , isótopo radiactivo del carbono, es de  $1,35 \cdot 10^{-10}\%$  en la madera de los árboles vivos. Una muestra de 1,200 gramos de restos de madera encontrada en unas excavaciones presentaba una actividad radiactiva, debida al carbono-14, de 14,2 desintegraciones/minuto. Si la constante de desintegración del  $^{14}\text{C}$  es de  $3,92 \cdot 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ , estimar la antigüedad de los restos de madera.

Solución:  $7,58 \cdot 10^{10} \text{ s} \cong 2400$  años

## Cuestiones

1.- Explicar la diferencia entre la cantidad de energía desprendida en una reacción química y en una reacción nuclear.

2.- ¿Puede un núcleo de Ca fisionarse? Razonar.

3.- Diferencias entre fusión y fisión nucleares.

4.- ¿Por qué no existen átomos de número másico muy grande (por ej.  $A = 1000$ ) ?

5.- Razonar si las siguientes afirmaciones son ciertas o falsas:

- a) Una vez transcurridos dos periodos de semidesintegración, todos los núcleos de una muestra radiactiva se han desintegrado.
- b) La actividad de una muestra radiactiva es independiente del tiempo.

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