

TEMA 5 : FÍSICA NUCLEAR:

- 5.1 Núcleo atómico; fuerzas nucleares.
- 5.2 Estabilidad nuclear; energía de enlace.
- 5.3 Radiactividad; leyes.
- 5.4 Reacciones nucleares; fisión y fusión.
- 5.5 Aplicaciones de la radiactividad y de las reacciones nucleares.

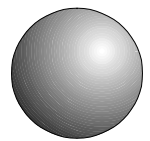
5.1 NÚCLEO ATÓMICO; FUERZAS NUCLEARES.

Introducción: Modelos atómicos.

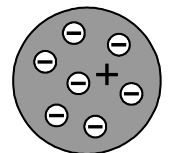
Desde la antigüedad han ido evolucionando las ideas sobre la constitución de la materia. En la Grecia clásica compitieron dos creencias: frente a los que creían que la materia podía dividirse indefinidamente, estaban los atomistas, como **Demócrito**, que defendían que existía algo indivisible (átomo) que era la base de la estructura de la naturaleza.



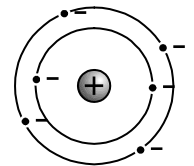
Hay que esperar hasta el s. XIX para encontrar la primera teoría científica. **John Dalton** (1813), vuelve a proponer la teoría atómica para explicar estructura de la materia, reacciones químicas, etc. Ahora bien, supone que el átomo es totalmente indivisible, sin estructura interna.



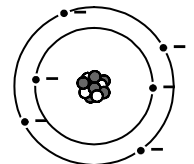
En 1897, **Joseph John Thomson** descubre una partícula que surge del átomo en ciertos experimentos (tubo de rayos catódicos): el electrón. Por tanto, incluye esta partícula dentro de la estructura del átomo. Su modelo es conocido con el nombre del "pastel de pasas".



E. Rutherford, en 1910, bombardeando una lámina metálica con partículas alfa, descubre que el átomo es en su mayor parte espacio vacío. La mayor parte de la masa está concentrada en su núcleo, de tamaño muy pequeño. Construye el llamado "modelo planetario". Supone que el núcleo es algo compacto, sin estructura interna.



Posteriormente fueron descubiertas nuevas partículas del núcleo. Primero el protón y luego el neutrón (**James Chadwick**, 1932), llevaron a la conclusión de que el núcleo también posee estructura interna. Actualmente se estudia dicha estructura, descubriéndose nuevas partículas subatómicas (más de doscientas).



(Este modelo planetario, que incluye un núcleo con protones y neutrones, y una corteza con electrones, se sigue conociendo como modelo de Rutherford. Es el que usaremos en este tema)

❖ Estructura del átomo: partículas subatómicas:

- Corteza atómica: **electrones** (${}_{-1}^0e^{-}$). Carga: $-1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; Masa: $9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$. Interviene en reacciones químicas, radiación térmica, efecto fotoeléctrico...

- Núcleo: **protones** (${}_{1}^1p^{+}$). Carga: $1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$; Masa: $1,6725 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ (= 1,0073 uma)
neutrones (${}_{0}^1n$). Carga: neutro; Masa: $1,6748 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ (= 1,0086 uma)
 (1 uma = $1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$)

• Características del núcleo:

Tamaño: radio $\sim 10^{-15} \text{ m}$ (1/100000 del 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 encontrarnos (tanto natural como artificial). Cada nucleido viene caracterizado por Z y A , y su representación es ${}^A_Z X$. Según el valor que tomen Z y A tendremos:

Isótopos: Z , $\neq A$ ($\neq N$). Son átomos del mismo elemento, con diferente masa ${}^{12}_6 C$; ${}^{14}_6 C$

Isóbaros: $\neq Z$, $= A$. De distinto elemento ${}^{60}_{30} Zn$; ${}^{60}_{29} Cu$

Isótonos: $= N$. ${}^{57}_{26} Fe$, ${}^{58}_{27} Co$

Isómeros: $= Z$, $= N$, $= A$. Pero las partículas están distribuidas de forma diferente en su interior (\neq energía)

❖ Fuerzas nucleares: interacción fuerte:

La interacción nuclear fuerte fue propuesta por **Hideki Yukawa** en 1934.

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. Recordamos brevemente las características fundamentales de esta interacción:

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



Debido a esta 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).

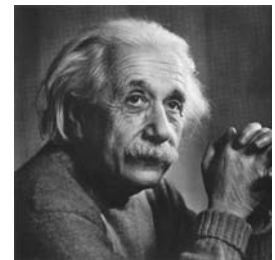
(Nota: eV (*electrónvoltio*): unidad de energía equivalente a $1,6 \cdot 10^{-19}$ J. La energía de las partículas subatómicas se da en estas unidades y sus múltiplos: keV = 10^3 eV, MeV = 10^6 eV.)

5.2 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 $E = m \cdot c^2$ 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 (Δm)**. Aunque sea una masa perdida, se considera su valor positivo. Se calcula con la expresión ($\Delta m = m_{\text{NÚCLEO}} - \sum m_{\text{PARTÍCULAS}}$).

¿Que 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 (E_n)** : 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.

En la figura 1 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.

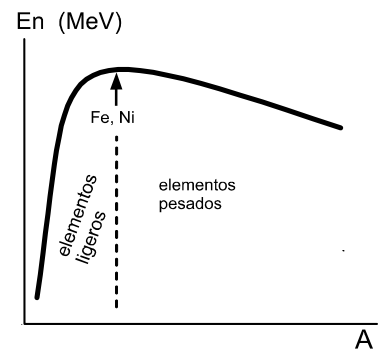


Fig. 1

❖ **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.

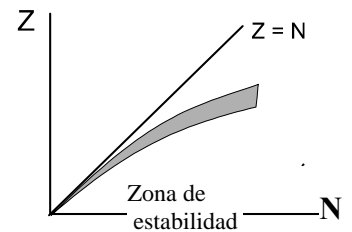
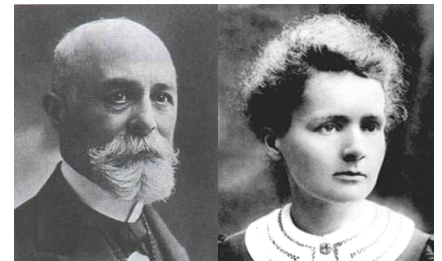


Fig. 2

5.3 RADIATIVIDAD; 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.

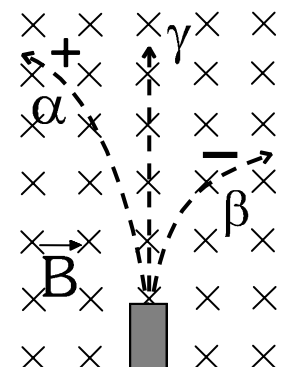


La radiactividad es un fenómeno que ocurre a nivel del núcleo. Éste, ya sea de forma natural o forzada, emite partículas de su interior. Esto trae como consecuencia que el número de partículas del núcleo cambie (puede cambiar Z y A). Es decir, la sustancia inicial puede transformarse en otra sustancia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

❖ **5.3.1 RADIATIVIDAD NATURAL:**

Se conocen básicamente tres tipos de radiactividad natural, representadas con α , β y γ . 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 α , se transforma en un núcleo del elemento situado dos lugares a la izquierda en la tabla periódica. Es decir, su nº atómico disminuye en dos unidades.
- 2- Cuando un núcleo emite una partícula β , se transforma en un núcleo del elemento situado un lugar a la derecha en la tabla periódica. O sea, su nº atómico aumenta una unidad.
- 3- Cuando un núcleo emite radiación γ , continúa siendo del mismo elemento químico.



Conociendo la constitución de los tres tipos de radiación pueden explicarse estas leyes:

α : (Partículas pesadas) Constituida por núcleos de ${}^4_2\text{He}$ (es decir, dos protones y dos neutrones)
Carga eléctrica ++; masa : 4,0026033 uma .

Al emitir una α , el núcleo se queda con $Z' = Z - 2$, $A' = A - 4$ ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\text{Y} + {}^4_2\alpha$

β^- : (Partículas ligeras) Formada por electrones (${}^0_{-1}e^-$). Carga eléctrica: $-e$; masa: 0,000549 uma.

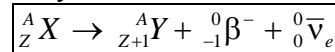
¿Cómo puede salir un electrón del núcleo? La responsable de esta aparente contradicción es la interacción nuclear débil. Como ya tratamos brevemente cuando estudiamos las interacciones fundamentales de la naturaleza, esta fuerza actúa transformando unas partículas en otras. En este caso, es un neutrón del núcleo el que se transforma, se descompone.

El electrón emitido se forma dentro del núcleo mediante la reacción ${}^1_0n \rightarrow {}^1_1p^+ + {}^0_{-1}e^- + {}^0_0\bar{\nu}_e$

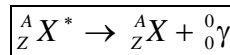
La partícula ${}^0_0\bar{\nu}_e$ (llamada *neutrino*) fue introducida teóricamente por el físico alemán **Wolfgang Pauli** en 1930, para salvar el que se cumpliera el principio de conservación de la energía y del momento angular. Fue detectado experimentalmente en 1957.

Tanto el electrón como el neutrino escapan del átomo, pero el protón se queda, atraído por la fuerza nuclear fuerte. Como consecuencia, Z aumenta en una unidad y el número de nucleones se queda igual:

$$Z' = Z + 1, \quad A' = A$$



γ : (radiación electromagnética, fotones) Sin masa, sin carga. El núcleo simplemente pierde energía. Sigue siendo un núcleo del mismo elemento químico.



La energía de los fotones liberados está relacionada con la frecuencia ν de la radiación mediante la expresión

$$\boxed{E_\gamma = h \cdot \nu}$$

donde $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$ J·s , es la *constante de Planck*.

Otras emisiones radiactivas: la desintegración β^+ y la antimateria.

La partícula β^+ , (llamada *positrón* o *antielectrón*), fue descubierta por el estadounidense **C. Anderson** en 1932, estudiando los rayos cósmicos, partículas de alta energía que provienen del espacio. Es idéntica al electrón en cuanto a su masa, pero tiene carga positiva (sería ${}^0_1e^+$). También procede de la interacción nuclear débil, al descomponerse un protón del interior del núcleo, mediante la reacción ${}^1_1p^+ \rightarrow {}^1_0n + {}^0_1e^+ + {}^0_0\nu_e$

Así, tras la descomposición, en el núcleo tenemos un protón menos y un neutrón más, con lo que Z se reduce en una unidad y A permanece igual. ${}^A_Z\text{X} \rightarrow {}^A_{Z-1}\text{Y} + {}^0_1\beta^+ + {}^0_0\nu_e$

Antimateria: El positrón es la primera de toda una serie de partículas descubiertas posteriormente, conocidas como *antimateria*. Por cada tipo de partícula existente en la naturaleza (protones, electrones, neutrinos...), existe su tipo correspondiente de *antipartícula*: una partícula con igual masa y características, pero con carga de signo opuesto. Tendremos así el *antiprotón* (${}^1_{-1}p^-$), el *antineutrón* (que coincide con el neutrón), el *antineutrino* (${}^0_0\bar{\nu}_e$) ...

Cuando una partícula interacciona con su correspondiente antipartícula, ambas se desintegran, desaparecen, toda su masa se transforma íntegramente en energía (fotones). Si recordamos la ecuación de Einstein $E = m \cdot c^2$, de la reacción de 1 kg de materia con otro kg de antimateria se obtendrían $1,8 \cdot 10^{17}$ J de energía (es decir, más o menos la energía necesaria para mantener encendidas un millón de bombillas de 100 W durante 57 años). Sería una fuente de energía incomparable. Sin embargo, actualmente la antimateria sólo se produce partícula a partícula, en los laboratorios o en los rayos cósmicos procedentes del espacio, y se desintegran casi instantáneamente al chocar con la

5.3.2 LEY DE DESINTEGRACIÓN RADIATIVA:

Al emitir radiación, la sustancia se va transformando en otra diferente. Esta transformación no es instantánea, ya que no todas las desintegraciones se producen a la vez. Además, es un proceso aleatorio, 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: Esta influencia viene marcada por la llamada **constante de desintegración (λ)**. Se mide en s^{-1} . Cada sustancia radiactiva tendrá su λ . Indica la probabilidad de que un núcleo se desintegre en la unidad de tiempo.

Número de átomos que tengamos en cada instante: N

Así, la ley de desintegración queda

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

La magnitud $\frac{dN}{dt}$ se denomina **actividad**, 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).

Otra unidad es el *curie* (Ci) $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$

Desarrollando la ley de desintegración (integrando)

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda \cdot N \rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda \cdot dt \rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\int_0^t \lambda \cdot dt \rightarrow \ln N - \ln N_0 = -\lambda \cdot t \rightarrow \ln \frac{N}{N_0} = -\lambda \cdot t$$

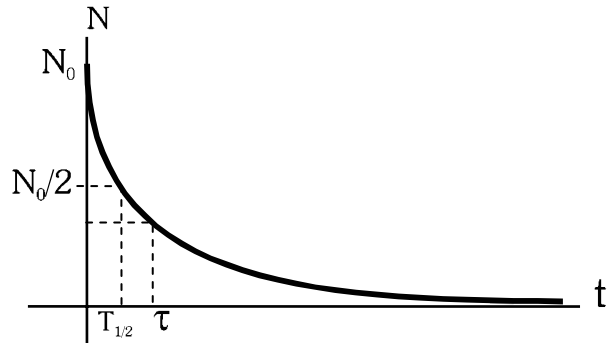
$$\rightarrow \frac{N}{N_0} = e^{-\lambda \cdot t} \rightarrow N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t}$$

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

N_0 : nº de átomos inicial.

Se trata de una disminución exponencial. Inicialmente, cuando el número de átomos es elevado, mayor será también 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 disminuye y la pendiente se va haciendo menor.

Lógicamente, a medida que N de la sustancia inicial disminuye, aumenta al mismo ritmo la cantidad de la sustancia final.



Otras magnitudes características de la desintegración radiactiva

Vida media (τ): Promedio de tiempo que tarda en desintegrarse un núcleo. $[\tau] = s$.

Estadísticamente se considera el tiempo que tarda la cantidad de átomos original (N_0) en reducirse hasta $\frac{N_0}{e}$

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

La ley de desintegración radiactiva puede expresarse entonces

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

Periodo de semidesintegración ($T_{1/2}$): Tiempo que tarda la cantidad inicial de núcleos en reducirse a la mitad. Se mide en s. (S.I).

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

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

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

Hay que tener en cuenta que, si al cabo de $T_{\frac{1}{2}}$, la muestra de átomos original se ha reducido a la mitad, al cabo de otro tiempo $T_{\frac{1}{2}}$, 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).

Familias radiactivas:

Los nucleidos radiactivos de masas elevadas (${}^{232}_{90}\text{Th}$, ${}^{237}_{93}\text{Np}$, ${}^{238}_{92}\text{U}$, ${}^{235}_{92}\text{U}$), no desprenden una única partícula hasta alcanzar la estabilidad (normalmente un isótopo del plomo, el elemento pesado más estable). Van desprendiendo sucesivamente partículas α y/o β , pasando la transformación por diferentes núcleos (entre 10 y 14) hasta llegar al plomo. Este conjunto de nucleidos intermedios es lo que se denomina *serie o familia radiactiva*. Cada uno de los elementos que aparecen arriba tiene su propia serie radiactiva.

Para el torio, ${}^{232}_{90}\text{Th}$, 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 α y/o β , tienen igualmente masa atómica múltiplo de 4.

La serie del neptunio, ${}^{237}_{93}\text{Np}$, es $4n+1$. La del ${}^{238}_{92}\text{U}$, $4n+2$; y la del ${}^{235}_{92}\text{U}$, $4n+3$. La siguiente tabla resume los núcleos iniciales y finales de cada serie.

Nombre	A	El. inicial	Período	El. final
Torio	$4n$	${}^{232}_{90}\text{Th}$	$1,4 \cdot 10^{10}$ años	${}^{208}_{82}\text{Pb}$
Neptunio (artificial)	$4n+1$	${}^{237}_{93}\text{Np}$	$2,2 \cdot 10^6$ años	${}^{209}_{83}\text{Bi}$
Uranio - Radio	$4n+2$	${}^{238}_{92}\text{U}$	$4,5 \cdot 10^9$ años	${}^{206}_{82}\text{Pb}$
Uranio - Actinio	$4n+3$	${}^{235}_{92}\text{U}$	$7,2 \cdot 10^8$ años	${}^{207}_{82}\text{Pb}$

5.4 REACCIONES NUCLEARES: FISIÓN Y FUSIÓN (Radiactividad artificial)

Se pueden conseguir artificialmente transformaciones en los núcleos atómicos "bombardeándolos" con partículas (α , 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 α , y observar que aparecía oxígeno y se desprendían protones.

En 1934, el matrimonio **Joliot-Curie**, bombardeando boro con part. α , 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).

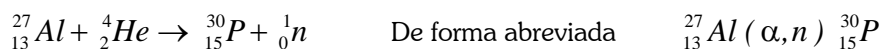
En toda reacción nuclear se van a conservar (además de energía y cantidad de movimiento, como en toda colisión)

- La carga eléctrica total antes y después del choque
- El número total de nucleones (ΣA)
- La suma de los números atómicos (ΣZ)

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.

Representación de 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,α), (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 $E_r = \Delta m \cdot c^2$ $\Delta m = \sum m_{\text{PRODUCTOS}} - \sum m_{\text{REACTIVOS}}$

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:

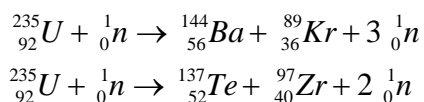
- Si $Q > 0$ ($E_r < 0$), la reacción es exotérmica, y se producirá naturalmente.
- Si $Q < 0$ ($E_r > 0$), la reacción es endotérmica, y no se producirá naturalmente. Habrá que suministrar energía a las partículas para que se dé la reacción

5.4.1 FISIÓN NUCLEAR:

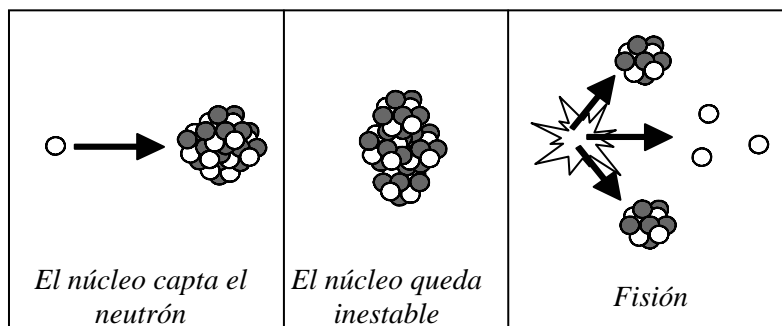
Rotura de un núcleo en otros más pequeños, al ser bombardeados (normalmente con neutrones). Generalmente va acompañada de desprendimiento de varios neutrones y energía.

Este fenómeno se da para **núcleos pesados** (más pesados que el hierro). Desprenden energía al romperse (fisionarse) en otros núcleos más pequeños. Principalmente ${}_{92}^{235}\text{U}$ y ${}_{94}^{239}\text{Pu}$

Ejemplo: reacciones que se producen en las centrales nucleares:



Las energías desprendidas son del orden de 200 MeV por cada núcleo de uranio fisionado.



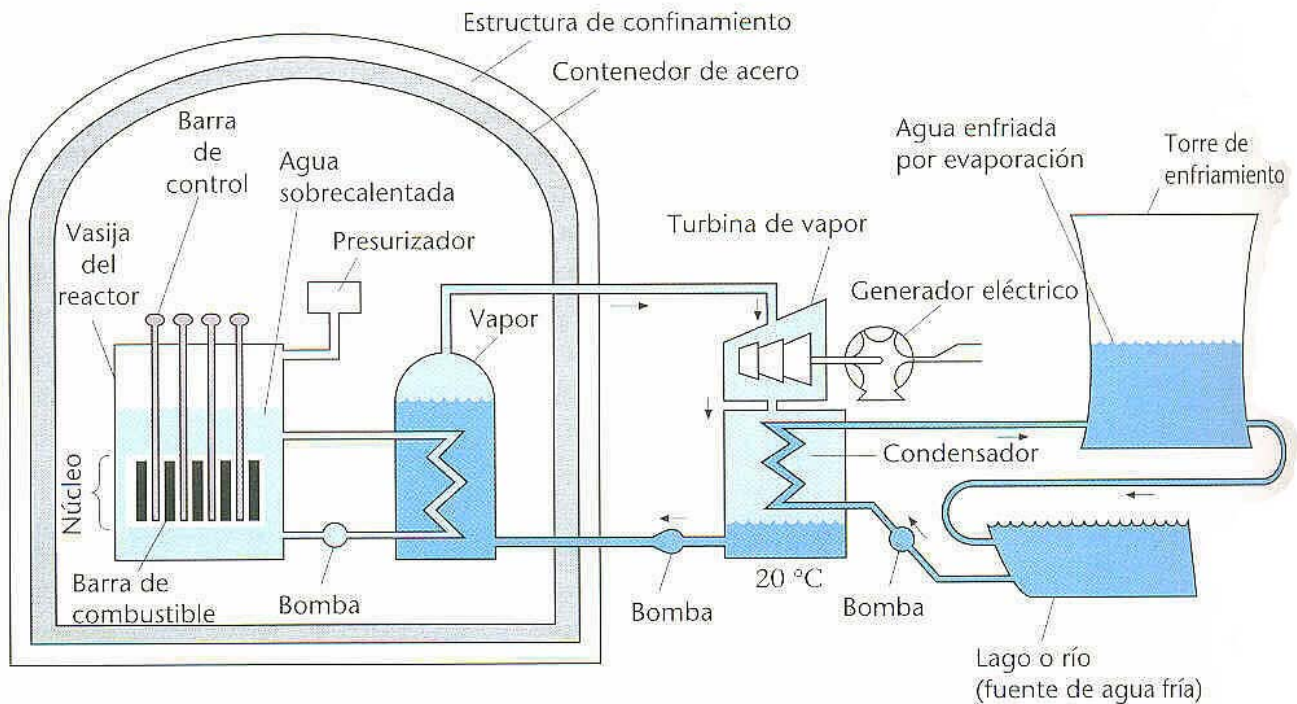
Como se puede observar, cada reacción desprende un mayor número de neutrones de los que absorbe. Estos neutrones podrán chocar con nuevos átomos de Uranio, volviéndose a producir la fisión, con desprendimiento de energía y más neutrones, y así sucesivamente. A esto se le denomina **reacción en cadena**. 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 ${}_{92}^{235}\text{U}$ o ${}_{94}^{239}\text{Pu}$, 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)



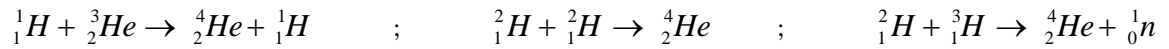
En el núcleo del reactor, las barras de combustible (que contienen entre un 1% y un 4% de óxido de uranio o plutonio), sufren la fisión, generando núcleos más ligeros y desprendiendo neutrones. Estos productos salen a gran velocidad, y son frenados al chocar con las moléculas de la sustancia moderadora que rodea las barras de combustible (agua pesada D_2O , 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.

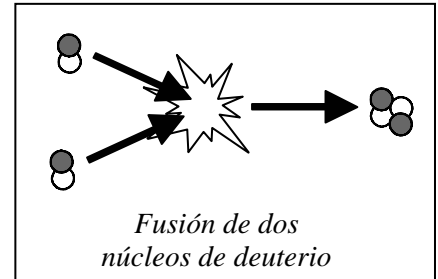
Las barras de control, de cadmio generalmente, son necesarias para mantener la reacción a ritmo adecuado. El Cadmio absorbe los neutrones en exceso, impidiendo que la reacción en cadena se descontrole. Introduciendo o retirando barras se acelera, ralentiza o incluso se detiene la reacción.

5.4.2 FUSIÓN NUCLEAR:

Unión de dos núcleos ligeros (menos pesados que el hierro) para formar uno solo. Va acompañada de desprendimiento de energía y, en ocasiones, de otras partículas. Las más comunes:

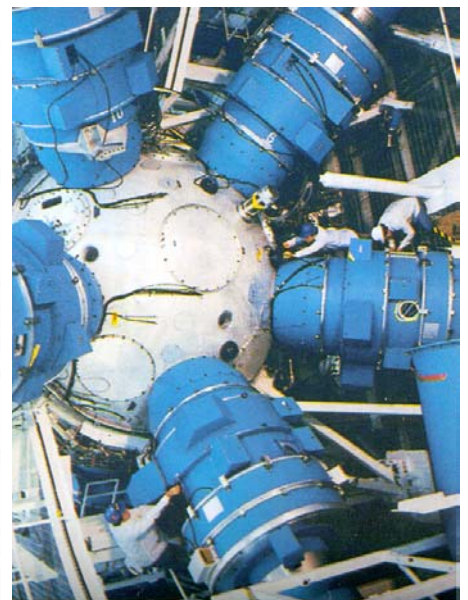
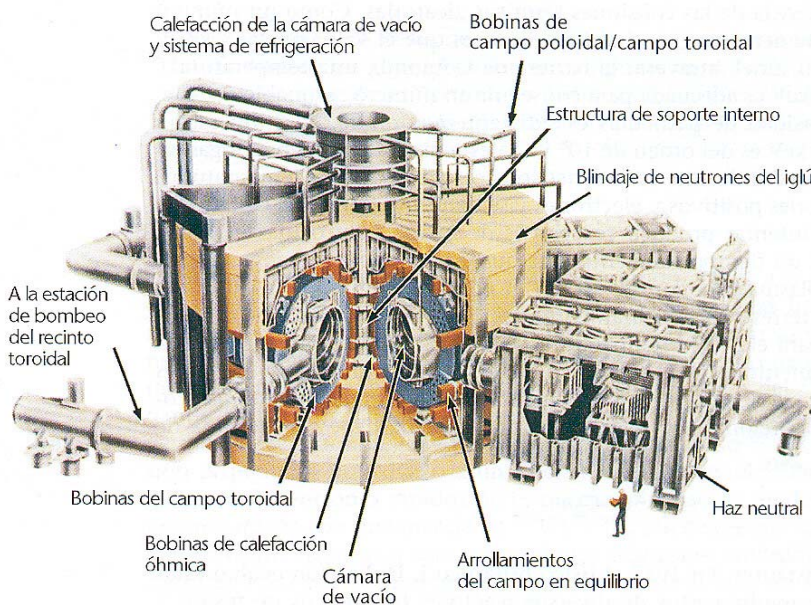


La energía desprendida en estas reacciones es de aprox. 18 MeV, una cantidad menor que la producida en la fisión de un núcleo de Uranio. Pero en un gramo de Hidrógeno se producirá un mayor número de reacciones que en un gramo de Uranio, ya que tenemos mayor cantidad de átomos. En total, la energía obtenida 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.



Tokamak Stellarator

5.5 LA FÍSICA NUCLEAR Y LA SOCIEDAD.

5.5.1 APLICACIONES DE LA RADIATIVIDAD Y LAS REACCIONES NUCLEARES

Aplicaciones de los isótopos radiactivos:

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 utilidades:

Medicina: Localización y tratamiento de tumores cancerosos, destrucción de tejidos malignos (son más sensibles a la radiación), estudio de circulación sanguínea, tratamiento de leucemia (P-32)

Biología: Estudio de fotosíntesis (C-14), 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 (Ba-140), Control de movimientos de aire y agua en la atmósfera (trazadores), Determinación de edad de rocas y fósiles (C-14, método Libby-Arnold), (U-238)

Obtención de energía. Centrales nucleares

La energía de reacción desprendida en la fisión de algunos elementos (U, Pu) puede usarse para calentar agua, transformarla en vapor a alta presión y hacer que éste mueva la turbina de un generador de corriente eléctrica. Ese es el funcionamiento básico de una central nuclear.

En España, las centrales nucleares generan el 33% de la energía eléctrica.

5.5.2 INCONVENIENTES DE LA RADIATIVIDAD Y LAS REACCIONES NUCLEARES:

Efectos de las radiaciones sobre los seres vivos

Las radiaciones (α , β , γ , 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...

Peligros 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 un sitio "seguro" (cosa que no puede garantizarse *a priori*).

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)

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.

AMPLIACIÓN: QUARKS Y LEPTONES. PARTÍCULAS SUBATÓMICAS.

En los años 60 del siglo XX, una serie de experiencias que medían la interacción entre protones y electrones con bastante precisión (dispersión de electrones), arrojaron el sorprendente resultado de que los protones no tienen una distribución uniforme de carga en su interior. Es más, se comportan como si una parte del protón tuviera carga negativa.

Por otro lado, el desarrollo y mejora de los aceleradores de partículas permitió aumentar la energía de las colisiones entre partículas y núcleos. Esto hizo que entre los años 30 y 60 se fuera descubriendo toda una serie de partículas subatómicas desconocida hasta entonces. Algunas de masa muy pequeña (o sin masa, como el neutrino ν), otras de masa intermedia entre electrones y protones (muones μ , mesones π y K) e incluso partículas de masas muy grandes comparadas con el protón (Λ , Σ , Ω ...). En consecuencia, la idea tan simple de que toda la naturaleza estaba formada sólo por tres partículas fundamentales se venía abajo.

La teoría de los quarks fue introducida por Murray Gell-Mann y George Zweig en 1964. Propone, básicamente, que la materia está formada por dos tipos de partículas: quarks y leptones.

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

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

En esta tabla tenemos un resumen de los tipos de partículas conocidos hasta ahora y que componen lo que se denomina el "modelo estándar".

		carga	masa
Leptones	Electrón (e^-)	- 1	$5,5 \cdot 10^{-4}$ uma (0,51 MeV)
	Neutrino e (ν_e)	0	0 (?)
Quarks	Up (u)	2/3	?
	Down (d)	- 1/3	?
Leptones	Muón (μ)	- 1	0,114 uma (106 MeV)
	Neutrino μ (ν_μ)	0	0 (?)
Quarks	Strange (s)	- 1/3	?
	Charme (c)	2/3	?
Leptones	Tau (τ)	- 1	1,92 uma (1784 MeV)
	Neutrino τ (ν_τ)	0	0 (?)
Quarks	Top (t)	2/3	?
	Bottom (b)	- 1/3	?

(Nota: cada partícula posee su correspondiente antipartícula, con lo que el número total de partículas es el doble del que aparece en la tabla)

Todas las partículas estables que constituyen la materia ordinaria que conocemos están formadas sólo por el primer grupo de partículas (electrón, neutrino e , quarks up y down) y sus correspondientes antipartículas. El protón está formado por dos quarks u y un quark d (la carga total será $2/3 + 2/3 - 1/3 = +1$); y el neutrón por dos quarks d y un quark u (carga total = $-1/3 - 1/3 + 2/3 = 0$).

Los otros dos grupos de partículas, de superior energía, sólo aparecen en los rayos cósmicos y en colisiones de altas energías en los aceleradores. Se cree que en las etapas iniciales del universo tras el Big Bang, cuando la temperatura del universo era inmensamente mayor, los tres grupos de partículas eran igual de comunes.

PARTÍCULAS RESPONSABLES DE LAS INTERACCIONES:

Una teoría planteada inicialmente por Heisenberg y desarrollada posteriormente por varios científicos propone que las interacciones (gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y débil) 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; otras, aún no.

Interacción	Partícula
gravitatoria	gravitón (no observada)
Electromagnética	fotón
Nuclear fuerte	gluón (no observada)
Nuclear débil	Bosones W y Z

PROBLEMAS TEMA 5: FÍSICA NUCLEAR

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.

2.- Determinar el defecto de masa y la energía de enlace por nucleón del isótopo ^4_2He .

[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]

3. a) Indicar las partículas constituyentes de los dos nucleidos ^3_1H y ^3_2He 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 ; $m_{\text{n}} = 1,0086$ u ; $m_{\text{p}} = 1,0073$ u ; 1 u = $1,66 \cdot 10^{-27}$ kg ; $c = 3 \cdot 10^8$ m s⁻¹)

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.

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

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?

7.- El periodo de semidesintegración de $^{51}_{24}\text{Cr}$ 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.

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.

($N_{\text{A}} = 6,02 \cdot 10^{26}$ kg-mol⁻¹ = n° de partículas que hay en 1 mol-kg) (considerar los meses de 30 días).

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

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

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 $^{238}_{92}\text{U}$

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

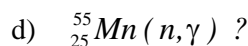
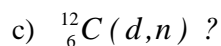
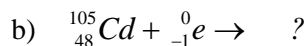
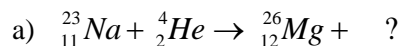
13.- Una de las reacciones posibles de fusión del $^{239}_{94}\text{Pu}$ cuando capta un neutrón es la formación de $^{141}_{58}\text{Ce}$ y $^{96}_{42}\text{Mo}$, liberándose 3 neutrones. Formular la reacción y calcular la energía liberada por cada núcleo fisionado.

Datos: $m(^{239}_{94}\text{Pu})$: 239,052158 u ; $m(^{141}_{58}\text{Ce})$: 140,908570 u ; $m(^{96}_{42}\text{Mo})$: 95,90499 u ;

$m(^1_0\text{n})$: 1,008665 u ; $m(^0_{-1}\text{e}^-)$: 0,000549 u

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

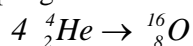
15.- Completar las siguientes reacciones nucleares:



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

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)

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



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.

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

CUESTIONES TEÓRICAS:

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?

SOLUCIONES A LOS PROBLEMAS

1. 35,457 uma

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

3. a) radiación β^- ;

b) $E_e(\text{H}) = 7,89 \text{ MeV}$; $E_e(\text{He}) = 6,53 \text{ MeV}$. Más estable H.

4. $2,8 \cdot 10^6 \text{ kg}$ carbón.

5. ${}^{206}_{82}\text{Pb}$

6. 0,674 %

7. a) 38,95 días ; b) $3,52 \cdot 10^{17}$ átomos

8. a) Hace 1 mes $9,78 \cdot 10^{21}$ át., en 2 meses $1,27 \cdot 10^{17}$ át.;

b) 5,545 días; c) $3,32 \cdot 10^{14} \text{ Bq}$.

9. 1,83 %

10. 962,7 h.

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

12. $\nu = 4,18 \cdot 10^{21} \text{ Hz}$

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

14. 9,85 MeV

16. Nucleido estable final ${}^{210}_{82}\text{Pb}$

17. Hace 2300 años aprox.

18. a) $8,657 \cdot 10^{13} \text{ J/kg}$

b) Mayor en el O.