

9 Familias o series radiactivas

La mayoría de los elementos radiactivos encontrados en la naturaleza son miembros de tres series radiactivas, y cada serie está formada por una sucesión de núclidos que proceden de un progenitor y todos ellos tienen un número atómico igual o mayor que el talio 81. Los miembros de cada serie se desintegran unos en otros, en orden decreciente del número másico.

Con el descubrimiento de los elementos transuránicos, esto es, de número atómico superior al uranio 92, y con la posibilidad de producir nuevos isótopos artificiales se materializó una cuarta serie radiactiva la serie $4n + 1$ llamada del neptunio.

Serie 4n

Los núclidos cuyos números másicos siguen la ecuación $A = 4n$, donde n es un número entero, son todos ellos divisibles por 4, y pueden desintegrarse unos núclidos en otros, disminuyendo el valor del número másico A . Los núcleos radiactivos cuyos números másicos obedecen a esta ley se dice que son miembros de la serie $4n$, fig.12.12. El elemento original de la serie es el isótopo del torio 232, y el producto final es el isótopo estable del plomo 208.

Serie 4n + 1

Una nueva serie es la $A = 4n + 1$, en la que si se resta 1 al número másico se obtiene para todos los elementos de la serie, un número divisible por 4. En esta serie todos sus miembros son isótopos radiactivos artificiales. Su progenitor, es un núcleo situado a la derecha del uranio, el neptunio 237. Esta familia termina como elemento final en el bismuto 209.

Serie 4n + 2

Se inicia con el uranio 238 mediante la emisión α , formándose el torio 234 y mediante la emisión β da lugar al protoactinio 234. Este a su vez emite otra partícula α y produce el uranio 234, que emitiendo otra partícula α da el torio 230 y finalmente emitiendo otra α , llega a formar el isótopo del radio 226. Esta serie de desintegración radiactiva, denominada serie uranio-radio, está formada por núclidos que tienen en común que si se resta 2 a su número másico, se obtienen un número divisible por 4. Sus números másicos están dados por $A = 4n + 2$, fig.12.13. Después del radio 226 continúa de forma similar con otras cinco emisiones α y otras cuatro emisiones β , hasta llegar al isótopo estable del plomo 206.

Serie 4n + 3

Está formada por núclidos que al restarle 3 unidades resultan divisibles por 4, de ahí el nombre de la serie $4n + 3$. La serie del actinio empieza con el uranio 235 -llamado inicialmente actinouranio por los investigadores- mediante una emisión α , se produce torio 231 y por emisión β , el protoactinio 231, continúa con otra emisión α , para dar el núclido actinio 227 y mediante sucesivas emisiones α y β , acaba en el elemento estable plomo 207.

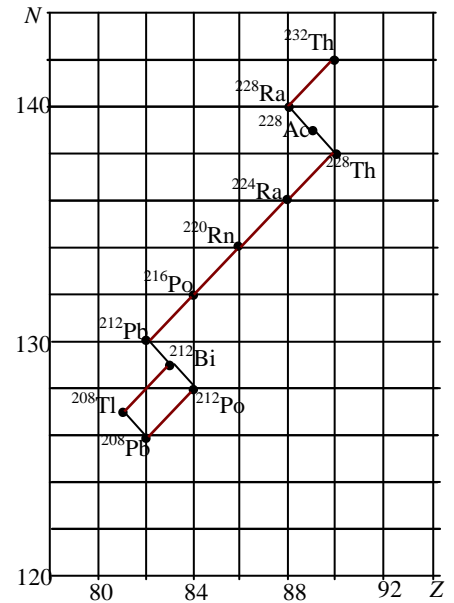


Fig.12.12. Serie de desintegraciones radiactivas del torio 232, es la serie $4n$. En ordenadas está el número de neutrones N y en abscisas el de protones Z . Los segmentos rojos representan las desintegraciones α y los negros las desintegraciones β .

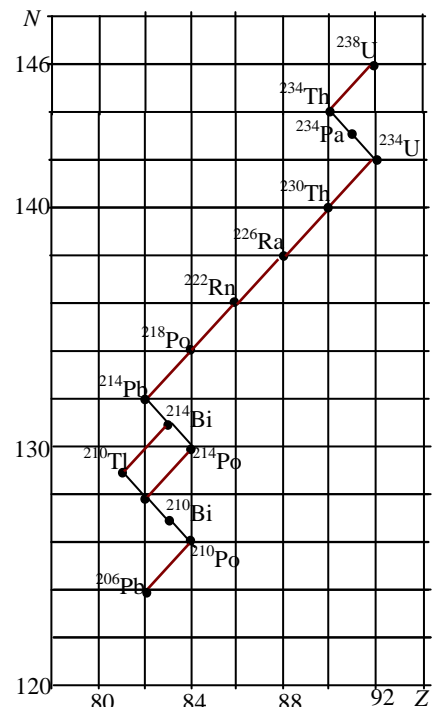
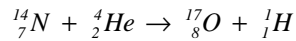


Fig.12.13. Serie de desintegraciones radiactivas del uranio 238, es la serie $4n + 2$.

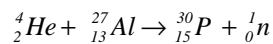
10 Radiactividad artificial

Rutherford en 1919, provocó la primera reacción nuclear inducida artificialmente, bombardeando nitrógeno gaseoso con partículas α . Observó que los núcleos de nitrógeno atrapaban estas partículas y emitían protones muy rápidamente, formando el isótopo estable del oxígeno 17. Recordando que la partícula α es el núcleo de helio y el protón el del hidrógeno, la reacción nuclear es la siguiente.

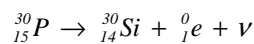


En 1934 Frédéric e Irène Joliot-Curie descubren la radiactividad artificial, en la que se emitían unas partículas de masa igual a la del electrón pero de carga positiva, conocida como *positrón*, se representa por β^+ , para diferenciarlo del electrón β , o también β^- , si pudiera haber confusión.

Con partículas α procedentes de una fuente radiactiva de polonio, bombardearon el elemento aluminio 27 y observaron que después de quitar la fuente de polonio, el detector de radiación seguía registrando radiactividad, que necesariamente tendría que provenir de otra sustancia. Después de repetir el experimento llegaron a la conclusión que el aluminio bajo la acción de las partículas α , se había vuelto radiactivo. Las partículas α , al chocar con los núcleos de aluminio son capturadas y los núcleos resultantes se hacen inestables, desintegrándose con la expulsión violenta de neutrones.



El núclido de fósforo obtenido resultó radiactivo, desintegrándose emitiendo positrones por transformación de un protón en un neutrón. Como la carga eléctrica se ha de conservar, entonces el núcleo emite un electrón positivo β^+ representado por $({}^0_1e)$, acompañado de un neutrino ν . *En la emisión β^+ el número de protones Z decrece en una unidad y también el número atómico, pero no varía el número másico A .* Por ejemplo:



La emisión de un positrón va acompañada de un neutrino, al igual que la emisión de un electrón iba acompañada de un antineutrino $\bar{\nu}$.

Fermi propuso en 1934 otra reacción nuclear que consistía en bombardear núcleos con neutrones, pues al carecer de carga eléctrica no serían rechazados, de manera que si después se producía una emisión β^- por transformación de un neutrón en un protón, el elemento aumentaría el número atómico en una unidad. Irradiando uranio con neutrones de una fuente de radio-berilio, Otto Hahn en Berlín, en 1938 inició, la búsqueda de los elementos transuranidos, sin embargo, lo que consiguió fue bario, un elemento menor que el uranio, porque éste se partió en dos núcleos más ligeros por efecto del bombardeo con neutrones. La reacción llamada de fisión nuclear, producía también más neutrones libres y mucha energía, lo que hizo pensar en la posible construcción de los reactores nucleares.

Desde entonces se han descubierto muchísimas reacciones nucleares, y se han bombardeado los núcleos de todos los elementos de la tabla periódica con partículas alfa, protones, neutrones y deuterones, de hecho todos los elementos situados a continuación del uranio número atómico 92, se han obtenido de forma artificial y son elementos radiactivos que se descomponen con un semiperiodo distinto $T_{1/2}$ para cada isótopo.

Elementos radiactivos naturales, de número atómico inferior al Talio 81

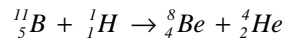
Se han encontrado muy pocos en la naturaleza, son los siguientes:

Elemento	Emisión	$T_{1/2}$ /años
${}^3_1\text{H}$ (Tritio)	β	12,3
${}^{14}_6\text{C}$	β	5 730
${}^{40}_{19}\text{K}$	β	$1,28 \cdot 10^9$
${}^{87}_{37}\text{Rb}$	β	$61,5 \cdot 10^9$
${}^{115}_{49}\text{In}$	β	$6 \cdot 10^{14}$
${}^{138}_{57}\text{La}$	β	$2 \cdot 10^{11}$
${}^{147}_{62}\text{Sm}$	β	$1,25 \cdot 10^{11}$
${}^{176}_{71}\text{Lu}$	β	$3 \cdot 10^{10}$
${}^{187}_{75}\text{Re}$	β	$5 \cdot 10^{10}$

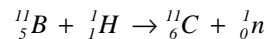
Transmutación con protones

Son reacciones en las cuales la partícula incidente es un protón. El núcleo que actúa de blanco tiene alrededor su campo eléctrico, que repele a los protones por ser partículas con carga positiva, de modo que deben llegar con la energía necesaria para poder superar la barrera de potencial. Las partículas resultantes de la reacción nuclear tienen energía cinética, aunque no se especifique su valor en la reacción.

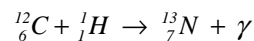
- La reacción nuclear producida cuando la partícula incidente es un protón p y la emitida una partícula α , se llama (p, α) . Por ejemplo el bombardeo con protones del boro.



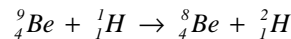
- Otro suceso es bombardear con protones y la emisión de neutrones por parte del núcleo, es la reacción nuclear del tipo (p, n) . Ejemplo:



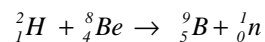
- Cuando el protón es capturado por el núcleo y se emite un fotón de rayos γ , se llama reacción nuclear del tipo (p, γ) . Ejemplo:



- Si el protón es capturado por el núcleo y se produce un deuterón, que es un isótopo del hidrógeno compuesto de un protón y de un neutrón, con número atómico 1 y número másico 2. Ejemplo:



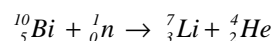
- Bombardeo con deuterones y emisión de neutrones. Ejemplo:



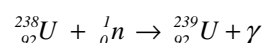
Transmutaciones con neutrones

Los neutrones, por su ausencia de carga eléctrica consiguen provocar más fácilmente las reacciones nucleares, por ser menos repelidos por los núcleos que los haces de protones o de partículas α , por ser positivos.

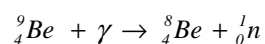
- Cuando se bombardea un núcleo con neutrones y éste emite partículas α , la reacción nuclear es (n, α) . Ejemplo:



- El núcleo absorbe un neutrón y se estabiliza emitiendo radiación γ . Se designa como captura radiactiva (n, γ) . Ejemplo:



- Transmutación provocada por fotones de radiación γ , que inestabilizan el núcleo y lo activan, emitiendo neutrones. Ejemplo:



11 Ley del decrecimiento radiactivo

Cuando un material radiactivo emite radiaciones, definimos *la actividad de la muestra A*, como la rapidez con que sus núcleos radiactivos se desintegran. Si inicialmente existían N núcleos de la muestra, la actividad A resulta:

$$A = -\frac{dN}{dt} \quad [12.6]$$

Como el número de núcleos presentes de la especie inicial, va a ir decreciendo en cada instante al desintegrarse el material, el signo de la derivada va a ser negativo y con objeto de que la actividad resulte una magnitud positiva ha sido necesario incluir el signo menos en la ec. [12.6].

La unidad de actividad radiactiva en el S.I. es el becquerel (Bq), que corresponde con la actividad de una muestra que produce una desintegración por segundo. Inicialmente se adoptó como unidad el curio (Ci), que es la actividad correspondiente a 1 g de radio, que equivale a $3,70 \cdot 10^{10}$ desintegraciones por segundo.

$$1 \text{ Ci} = 3,70 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

La actividad de una muestra radiactiva es proporcional al número de núcleos radiactivos presentes, $A = \lambda \cdot N$, donde λ es *la constante radiactiva o constante de desintegración*. Si λ es muy grande el elemento es muy activo, mientras que si λ es un valor pequeño, el elemento es poco activo.

Experimentalmente se observa que la actividad de una muestra decrece exponencialmente con el tiempo, fig.12.14, de modo que si la actividad en un instante inicial $t = 0$, es A_0 , la actividad que presenta en un instante t , posterior, se determina con la ecuación.

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad [12.7]$$

La desintegración de un núcleo es un fenómeno aleatorio, no es posible predecir cuando un determinado núcleo se va a desintegrar, sin embargo, es factible conocer el número de núcleos N , de una muestra radiactiva que todavía perdura después de un cierto tiempo t de haberse iniciado la desintegración de la muestra. Si es N_0 el número de núcleos presentes de una muestra en un instante $t = 0$, después de un tiempo t , el número es:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad [12.8]$$

Se define *la el periodo de semidesintegración o semivida, $T_{1/2}$* como el tiempo necesario para que el número de núcleos de una muestra radiactiva, se reduzca a la mitad de su valor inicial. Haciendo $N = N_0/2$.

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

Tomando logaritmos neperianos, resulta:

$$\ln \frac{1}{2} = -\lambda T_{1/2} \ln e ; \quad -\ln 2 = -\lambda T_{1/2} ; \quad \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{T_{1/2}} \quad [12.9]$$

La constante de desintegración λ , es característica de cada elemento.

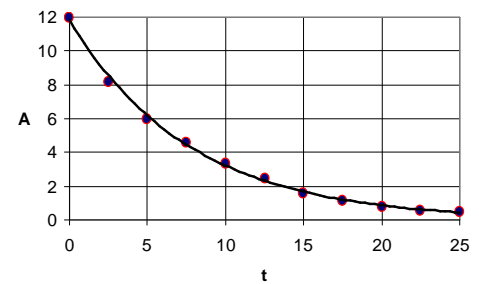


Fig.12.14. La actividad de una muestra radiactiva, decrece exponencialmente con el tiempo (las unidades de la gráfica son arbitrarias).

Si consideramos por ejemplo que el tiempo estuviese medido en horas, observa que después de 5 h, la actividad de la muestra se ha reducido de 12 a 6, es decir a la mitad de su valor inicial. Entonces el periodo de semidesintegración de esta muestra sería $T_{1/2} = 5$ h.

Vida media

Es un valor estadístico que representa, un promedio del tiempo de existencia de una muestra radiactiva. Se demuestra matemáticamente, que es el inverso de la constante radiactiva λ .

$$\bar{T} = \frac{1}{\lambda} = \frac{T_{1/2}}{0,693}$$

La vida media no debe confundirse con el periodo de semidesintegración.

$$T_{1/2} = 0,693 \bar{T}$$

Ejemplo

El periodo de semidesintegración del carbono 14, es $T_{1/2} = 5730$ años. Sabiendo que una muestra tiene en un instante una actividad $A_o = 2,8 \cdot 10^7$ Bq. Determina: a) La constante radiactiva. b) El número de núcleos presentes en la muestra y su masa c) La actividad de la muestra después de 5000 años. d) El número de átomos de carbono después de este tiempo.

a) La constante radiactiva o constante de desintegración.

$$\lambda = \frac{0,693}{5730 \cdot 365 \cdot 86400 \text{ s}} = 3,5 \cdot 10^{-12} \text{ Bq}$$

b) Como se verifica que: $A_o = \lambda \cdot N_o$; $N_o = \frac{2,8 \cdot 10^7}{3,5 \cdot 10^{-12}} = 7,9 \cdot 10^{18}$; átomos de C.

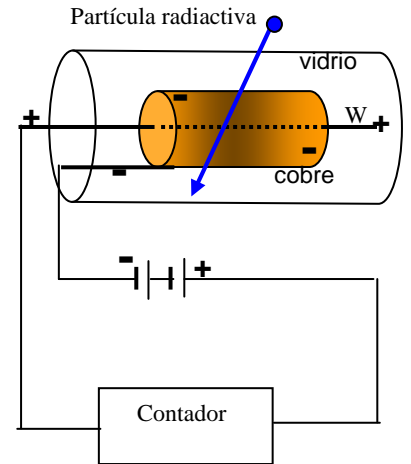
$$\text{Su masa: } m = \frac{N_o}{N_{\text{avogadro}}} \cdot \text{Mol(Carbono)} = \frac{7,9 \cdot 10^{18}}{6,02 \cdot 10^{23}} \cdot 14 \text{ g} = 1,84 \cdot 10^{-4} \text{ g}$$

c) Para $t = 5000$ años $= 5000 \cdot 365 \cdot 86400 \text{ s} = 1,58 \cdot 10^{11} \text{ s}$.

$$A = A_o e^{-\lambda t} = 2,8 \cdot 10^7 e^{-3,5 \cdot 10^{-12} \cdot 1,58 \cdot 10^{11}} = 1,61 \cdot 10^7 \text{ Bq}$$

a) El número de átomos de carbono 14 presentes será

$$N = \frac{A}{\lambda} = \frac{1,61 \cdot 10^7}{3,5 \cdot 10^{-12}} = 4,6 \cdot 10^{18} \text{ átomos}$$



El contador Geiger-Muller es un aparato para detectar radiactividad o rayos cósmicos. Consta de un tubo cerrado de vidrio de paredes delgadas, en cuyo interior hay aire a unos 5 mmHg, un cilindro de cobre abierto por las bases conectado negativamente y un alambre de wolframio como eje central, conectado positivamente.

Cuando una partícula radiactiva atraviesa el tubo de vidrio, al chocar con las moléculas del aire del interior, arranca electrones y además crea iones positivos. Entonces los electrones son atraídos por el alambre moviéndose hacia él, adquiriendo gran velocidad, de modo que en su recorrido pueden ionizar positivamente por choque, otras moléculas de aire. De este modo se produce una avalancha de iones positivos hacia el cilindro de cobre y de electrones hacia el alambre central, que se traduce en un impulso eléctrico que va por el circuito hasta el contador, donde se registran los impactos de cada una de las partículas radiactivas.

Tabla de algunos isótopos radiactivos				
Núclido	Emisión	Semivida $T_{1/2}$	Cte. λ	Energía /MeV ⁽¹⁾
$^{238}_{92}\text{U}$	α	$4,5 \cdot 10^9$ años	$4,88 \cdot 10^{-18}$	4,20
$^{235}_{92}\text{U}$	α	$7,1 \cdot 10^8$ años	$3,09 \cdot 10^{-17}$	4,56
$^{231}_{90}\text{Th}$	β	25,6 horas	$7,51 \cdot 10^{-6}$	0,30
$^{227}_{89}\text{Ac}$	α, β	21,6 años	$1,02 \cdot 10^{-9}$	$\alpha: 4,94$ $\beta: 0,046$
$^{215}_{83}\text{Bi}$	α, β	8 min.	$1,44 \cdot 10^{-3}$	-----
$^{211}_{84}\text{Po}$	α	0,52 seg.	1,33	7,44
$^{215}_{85}\text{At}$	α	10^{-4} seg.	$7 \cdot 10^3$	8,00
$^{241}_{94}\text{Pu}$	α, β	13,0 años	$1,69 \cdot 10^{-9}$	$\alpha: 4,89$ $\beta: 0,021$
$^{209}_{82}\text{Pb}$	β	3,30 horas	$5,84 \cdot 10^{-5}$	1,99
$^{226}_{88}\text{Ra}$	α	1620 años	$1,36 \cdot 10^{-11}$	4,78
$^{237}_{93}\text{Np}$	α	$2,2 \cdot 10^5$ años	$9,99 \cdot 10^{-15}$	4,87

(1) Se refiere a la energía cinética de las partículas emitidas.

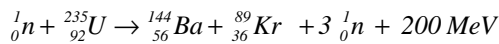
12 Reacciones de fisión y fusión

Durante las reacciones nucleares se libera gran cantidad de energía. Algunas de estas reacciones se dan en las estrellas como las reacciones de fusión, mientras que otras se producen de modo artificial y controlado, como la fisión nuclear y también actualmente la fusión del hidrógeno.

Fisión del uranio

Las reacciones de fisión nuclear son aquellas en las que un proyectil, el neutrón, colisiona con un blanco que es un núcleo pesado y queda absorbido. El núcleo se escinde en dos y produce además nuevos neutrones, que a su vez pueden originar nuevas reacciones nucleares, fig.12.15.

En la fisión con neutrones lentos de energías de excitación inferiores a 1 MeV, el neutrón absorbido inestabiliza el núcleo que se parte en dos núclidos intermedios del sistema periódico y en nuevos neutrones. Además, se libera una gran cantidad de energía en forma de energía cinética de los productos de la desintegración, un ejemplo es la fisión del uranio 235.



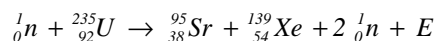
Estos productos no son únicos y también pueden obtenerse ciertos núclidos como por ejemplo, xenón 140 y estroncio 94, u otros núcleos acompañados de dos o tres neutrones. Los productos de la fisión son radiactivos.

Los neutrones liberados son neutrones rápidos y no pueden producir nuevas fisiones, sin embargo convenientemente frenados por un moderador disminuyan su energía cinética y entonces penetran en nuevos núcleos de uranio 235 provocando nuevas fisiones. Así, una vez iniciada la fisión mediante una fuente de neutrones, los nuevos neutrones producidos autoalimentan la reacción nuclear produciendo una reacción en cadena.

Otra reacción de fisión se puede conseguir con el plutonio 239. Este se obtiene por bombardeo con neutrones del uranio 238 que no es fisionable y que pasa a uranio 239, para después a través de una emisión β , transformarse en neptunio 239, que con otra emisión β se convierte en plutonio. .

Ejercicio

Calcula la energía producida en la fisión del uranio 235, según la reacción.



Masas: neutrón = 1,009 u; uranio = 235,17 u; estroncio = 94,960 u; xenón = 138,983 u

La disminución de masa producida en la reacción (defecto de masa), se ha transformado en energía de acuerdo con la ecuación $E = \Delta m \cdot c^2$

$$\Delta m = \text{masa}(U) + \text{masa}(n) - [\text{masa}(Sr) + \text{masa}(Xe) + 2 \text{masa}(n)]$$

$$\Delta m = 235,170\text{ u} + 1,009\text{ u} - [94,960\text{ u} + 138,983\text{ u} + 2 \cdot 1,009\text{ u}] = 0,218\text{ u}$$

$$E = \Delta m \cdot c^2 = 0,218\text{ u} \cdot \frac{1,6605 \cdot 10^{-27}\text{ kg}}{\text{u}} \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2 = 3,26 \cdot 10^{-11}\text{ J}$$

$$E = 3,26 \cdot 10^{-11}\text{ J} \cdot \frac{1\text{ eV}}{1,6 \cdot 10^{-19}\text{ J}} \approx 204\text{ MeV}$$

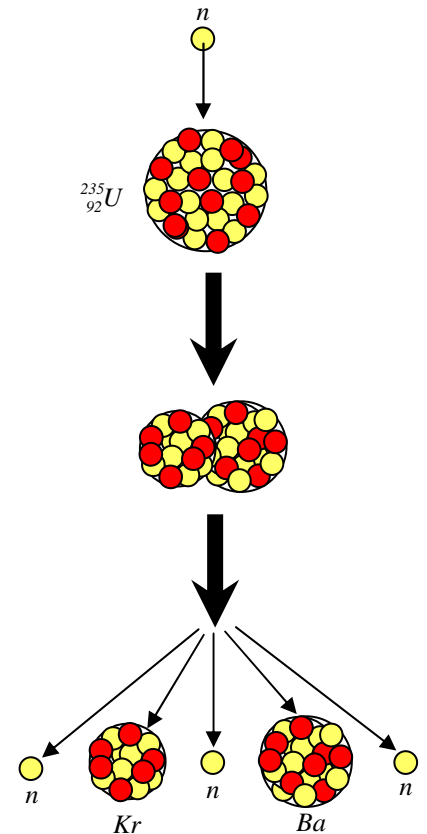


Fig. 12.15 En la reacción de fisión del uranio 235, el neutrón produce la fragmentación del núcleo, que se parte en dos núcleos intermedios y varios neutrones, además de una cantidad de energía. Ésta es equivalente a la disminución de la masa del sistema (defecto de masa), que aparece en forma de energía cinética en los productos de la reacción nuclear.

Reacciones de fusión

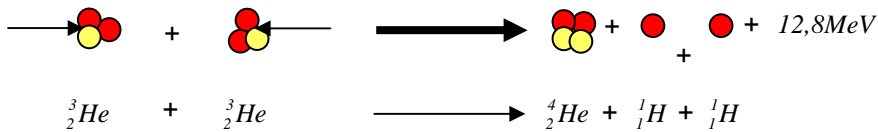
En el interior de las estrellas donde las temperaturas alcanzan decenas de millones de grados y la presión es muy elevada, se produce la unión de núcleos ligeros para sintetizar otros mayores, formando los elementos del sistema periódico hasta el hierro 26. Estas reacciones se conocen como de fusión nuclear y puesto que tienen que unirse núcleos con cargas positivas entre los que se produce una fuerte repulsión electrostática, solo se vence esta fuerza cuando las partículas colisionan con mucha energía cinética.

Desde el punto de vista de uso de la fusión nuclear por el hombre, parece un proyecto muy prometedor, por liberarse mucha energía, producir residuos menos contaminantes que los actuales y ser además un recurso prácticamente inagotable. Veamos algunas reacciones de fusión.

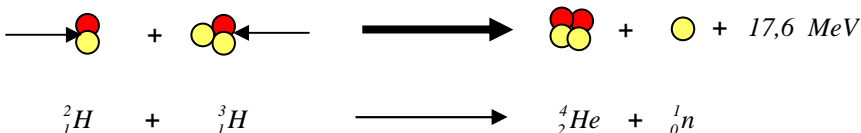
Los átomos de deuterio (un protón y un neutrón) se fusionan con otros también de deuterio, dando helio 3 y un neutrón. La reacción nuclear:



Una reacción tiene lugar entre dos átomos de helio 3, dando lugar a helio 4, dos protones y energía.



Otra reacción se da entre el deuterio y el tritio, que es el isótopo radiactivo del hidrógeno con dos neutrones y un protón. Al fusionarse producen helio 4 y un neutrón, con energías cinéticas muy importantes.



La reacción deuterio-tritio, es la que actualmente están intentando controlar los científicos con vistas a construir reactores nucleares de fusión en el futuro. Se trata de una reacción que utilizará como combustibles el deuterio extraído del agua del mar y el tritio, que al no existir libre en la naturaleza hay que conseguirlo artificialmente a partir del litio, mediante los neutrones liberados en la reacción nuclear anteriormente descrita.



En definitiva, los combustibles empleados serán el deuterio y el litio, que es muy abundante en la corteza terrestre.

La fusión se intenta por dos vías distintas, una empleando el combustible en estado sólido mediante el llamado confinamiento inercial y otra empleando una mezcla de iones a alta temperatura llamada plasma, es la llamada fusión por confinamiento magnético, fig.12.16.

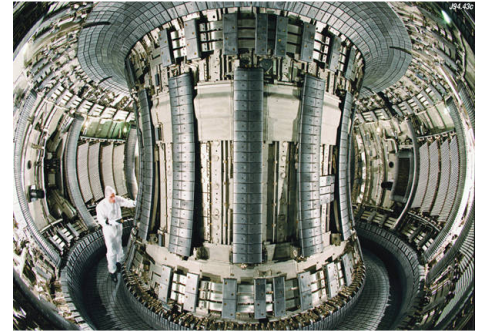


Fig.12.16. El tokamak es una cámara toroidal (un reactor) en cuyo interior se introduce el plasma formado por deuterio y tritio, inyectándose también energía para llevarlo a muy altas temperaturas, 116 millones de grados kelvin, para que se pueda producir la fusión. Como se trata de una mezcla de iones, se intentan controlar mediante la acción de potentes campos magnéticos producidos por las bobinas que se ven en la figura.

Para iniciar la fusión es necesario consumir mucha energía y el proceso será rentable cuando la energía liberada, supere ampliamente la energía invertida. Esta tecnología está actualmente, en fase de investigación y desarrollo.