

Lección 7: Energía Nuclear

1. Estabilidad nuclear

La parte central del átomo es el **núcleo**. Recordamos que el átomo tiene un tamaño típico del orden de $10^{-10} m$, mientras que el núcleo tiene un tamaño del orden de $1 fm = 10^{-15} m$. Los constituyentes del núcleo atómico son de dos tipos: protones y neutrones. A ambos de un modo conjunto se les denomina **nucleones**. Los protones tienen carga positiva, mientras que los neutrones no tienen carga. Siendo así, ¿por qué los nucleones se encuentran juntos en una pequeña región del espacio en vez de estar sueltos cada uno independientemente? La respuesta es la fuerza nuclear fuerte.

1.1. Masas nucleares y energía de ligadura por nucleón

La fuerza nuclear fuerte es la que mantiene unidos a los nucleones dentro del núcleo, y la magnitud que cuantifica cómo de favorable energéticamente es esta unión es la **energía de ligadura** B que para un núcleo con Z protones y N neutrones ($A = Z + N$ nucleones) A_ZX_N es:

$$B(Z, N) = \left[Nm_n + Zm_H - \underbrace{m({}^A_ZX_N)}_{\text{m. at. } X} \right] c^2,$$

donde m_n es la masa del neutrón, m_H es la masa atómica del hidrógeno y $m({}^A_ZX_N)$ la masa atómica de A_ZX_N .

B es la energía que habría que dar al núcleo para descomponerlo en sus constituyentes o, dicho de otro modo, la energía que se gana por tener a los nucleones formando un núcleo en vez de estar sueltos. Muchas veces se divide esta energía entre el número de nucleones y se habla de **energía de ligadura por nucleón** B/A .

Ejemplos

- La energía de ligadura por nucleón para ${}^{23}_{11}\text{Na}_{12}$ sabiendo que $m_n = 1,0086645 \text{ uma}$, $m_H = 1,007825 \text{ uma}$, $m({}^{23}_{11}\text{Na}_{12}) = 22,9898 \text{ uma}$ y $1 \text{ uma} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$ es:

$$B(Z = 11, N = 12) = [11m_H + 12m_n - 22,9898]c^2 = 186,5598 \text{ MeV}$$

Y la energía de ligadura por nucleón:

$$\frac{B(11, 12)}{A} = 8,11138 \text{ MeV}$$

- La energía de ligadura por nucleón para ${}^{62}_{28}\text{Ni}_{34}$ sabiendo que $m_n = 1,0086645 \text{ uma}$, $m_H = 1,007825 \text{ uma}$, $m({}^{62}_{28}\text{Ni}_{34}) = 61,92835 \text{ uma}$ y $1 \text{ uma} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$ es:

$$B(Z = 28, N = 34) = [28m_H + 34m_n - 61,92835]c^2 = 545,251 \text{ MeV}$$

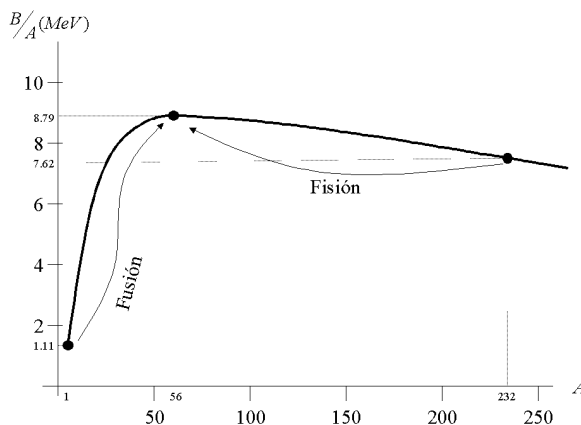
Y la energía de ligadura por nucleón:

$$\frac{B(28, 34)}{A} = 8,794 \text{ MeV}$$

Procediendo del mismo modo tenemos que $\frac{B}{A}({}_1^1\text{H}_0) \approx 1,12 \text{ MeV}$, $\frac{B}{A}({}_4^9\text{Be}_5) \approx 6,46 \text{ MeV}$, $\frac{B}{A}({}_6^{12}\text{C}_6) \approx 7,68 \text{ MeV}$, $\frac{B}{A}({}_{26}^{56}\text{Fe}_{30}) \approx 8,79 \text{ MeV}$, $\frac{B}{A}({}_{90}^{232}\text{Th}_{142}) \approx 7,62 \text{ MeV}$.

1.2. Estabilidad nuclear

Si se calcula la energía de ligadura por nucleón como acabamos de mostrar para cada elemento y se representa $\frac{B}{A}$ frente al número másico A , resulta cualitativamente la siguiente gráfica:



La curva de la gráfica es la interpolación hecha al tomar los valores de la energía de ligadura por nucleón frente al número másico. Sin embargo ni la curva es continua ni los valores para cada elemento se ajustan exactamente a la misma. Algunos como el ${}^4\text{He}$ tienen una energía de ligadura por nucleón mayor que átomos de mayor número másico como el ${}^9\text{Be}$: $7,07 \text{ MeV}$ frente a $6,46 \text{ MeV}$.

Lo que sí se verifica es que el máximo de la curva está en la zona en torno a $A = 60$ (${}^{56}\text{Fe}$ - ${}^{62}\text{Ni}$). Estos son los elementos que presentan la máxima energía de ligadura por nucleón de todos los elementos. Por tanto, son los elementos más estables. Ello quiere decir que son los núcleos que requieren más energía para descomponerlos en sus componentes o, dicho de otro modo, que cuando se forman liberan más energía.

Tomando como referencia el máximo de la curva, ésta queda dividida en dos ramas. A la izquierda del máximo la curva es creciente con A , entonces al crecer el número másico la energía de ligadura por nucleón aumenta con lo que un elemento es más estable (por lo general) que el anterior. Ello quiere decir que si unimos dos núcleos ligeros para formar un núcleo más pesado con $A < 60$ en ese proceso se libera energía. A este proceso en el que se generaría energía de origen nuclear se le denomina **fusión**.

A la derecha del máximo la curva es decreciente con A por lo que, en esta zona, una disminución en el número másico hace más estable al núcleo. Ello

quiere decir que rompiendo un núcleo pesado en dos núcleos más medianos con $A > 60$ se libera energía. A este proceso, en el que también se genera energía nuclear, se le denomina **fisión**.

En ambos casos, la energía liberada, que suele ser del orden del MeV por nucleón, se puede aprovechar como la producida por cualquier otro de los procedimientos tradicionales de generación de energía.

Como la rama a la izquierda del máximo tiene mayor pendiente, al producirse la fusión se libera mayor cantidad de energía por nucleón que en la fisión. Por tanto, la fusión es energéticamente más favorable para producir energía que la fisión aunque es tecnológicamente más difícil de conseguir.

2. Desintegración radiactiva

Hay muchos núcleos en la naturaleza que son estables, es decir, permanecen siempre con los mismos números atómico y másico. Sin embargo, hay otros núcleos que espontáneamente se transforman en otros distintos. A estos se les llama **radiactivos**. Para cada valor de A hay uno o dos núcleos estables. El carbono, por ejemplo, se encuentra en la naturaleza con distinto número másico: ${}^{12}_6C$, ${}^{13}_6C$, ${}^{14}_6C$. A núcleos con igual Z pero distinta N se les denomina **isótopos**. De todos los isótopos de cada elemento, algunos son estables y la mayoría son radiactivos. Por ejemplo, el ${}^{12}C$ es estable mientras que el ${}^{14}C$ es un núcleo inestable o radiactivo.

2.1. Tipos de desintegraciones radiactivas: α , β , γ .

En la naturaleza la mayoría de los núcleos que se conocen son radiactivos aunque no todos se desintegran de la misma forma. Hay tres formas conocidas de radiactividad llamadas: α , β y γ . Las α y β transforman un núcleo en otro diferente, mientras que la γ hace que el núcleo disminuya su energía pero no cambia su naturaleza. En este apartado estudiamos las características de los distintos tipos de desintegraciones radiactivas.

En cualquier desintegración nuclear se deben conservar:

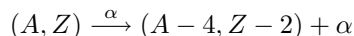
- la energía
- el momento lineal
- el momento angular
- la carga eléctrica
- el número másico

Con estas ideas en mente veamos cada tipo de desintegración:

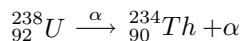
1. La desintegración $\alpha \equiv {}^4_2He^{2+}$ (núcleos de 4He)

En los procesos radiactivos α el núcleo original se transforma en otro con dos protones y dos neutrones menos (núcleo residual), esas cuatro partículas forman una partícula α que se emite con cierta energía cinética

y es la que puede interactuar con los seres vivos y ser peligrosa para ellos.



Ejemplo:



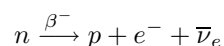
Estos procesos liberan energía ya que los productos de la desintegración están más ligados que el núcleo inicial. La energía sobrante se usa, en su mayor parte, para dar energía cinética a la partícula α y al núcleo residual. Son las partículas α emitidas las que interactúan con la materia y hacen peligrosa para los seres vivos la radiación.

Las partículas α son poco penetrantes y bastan unos pocos *cm* de aire para pararlas.

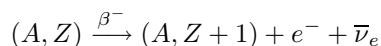
2. La desintegración $\beta \equiv e^-$ o e^+ (del núcleo)

Los procesos radiactivos β se presentan en dos modalidades: la desintegración β^- y la desintegración β^+ .

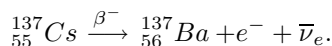
En la desintegración β^- un neutrón n se convierte en un protón p , más un electrón e^- , más un antineutrino electrónico $\bar{\nu}_e$. El e^- creado por esta transformación dentro del núcleo se emite, junto con el antineutrino, con cierta energía cinética.



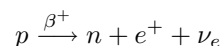
Por tanto, en un proceso β^- un núcleo se transforma en otro con un protón más y un neutrón menos:



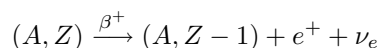
Ejemplo:



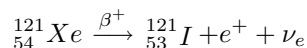
En la desintegración β^+ un protón p dentro del núcleo se transforma en un neutrón n más un positrón e^+ (antipartícula del e^- con iguales propiedades pero con carga positiva), más un neutrino electrónico ν_e . El e^+ creado por esta transformación dentro del núcleo se emite, junto con el neutrino, con cierta energía cinética.



Por tanto, en un proceso β^+ un núcleo se transforma en otro con un neutrón más y un protón menos:



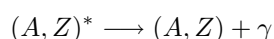
Ejemplo:



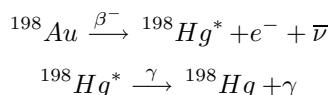
La energía liberada en la desintegración se emplea en dar energía cinética al $\bar{\nu}_e$ (ν_e), al e^- (e^+) y al núcleo hijo. Los neutrinos interactúan muy poco con la materia y no son peligrosos para los seres vivos pero los e^- o e^+ emitidos si interactúan con la materia y son los que hacen que la radiación sea peligrosa para los seres vivos.

La radiación β es de penetración media.

3. La desintegración γ (radiación electromagnética):
Tras la desintegración α o β de un núcleo, normalmente el núcleo resultante no se encuentra en su estado fundamental sino en un estado excitado. El núcleo se desexcita emitiendo fotones, es decir, radiación γ .



Ejemplo:



La radiación γ es radiación electromagnética de alta energía que interactúa con la materia y penetra mucho en ella.

2.2. Ley de desintegración radiactiva: actividad

De todos los núcleos conocidos sólo unos pocos son estables, el resto son radiactivos: se transforman en otros emitiendo radiación o partículas según acabamos de ver. El proceso de emisión radiactiva por parte del núcleo es instantáneo pero obedece a una ley estadística. En este apartado estudiamos esta ley.

Si en un instante t_0 tenemos una muestra con N_0 núcleos radiactivos, al cabo de un tiempo t quedarán en la muestra sin desintegrarse $N(t)$ (el resto, $N_0 - N(t)$ se habrán desintegrado transformándose en otro núcleo)

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

λ es una constante característica de cada núcleo denominada **constante de desintegración**. A veces se define la **semivida** de una sustancia como:

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

y es el tiempo que una población de N_0 núcleos radiactivos tarda en reducirse a la mitad $N_0/2$:

$$N(T_{1/2}) = \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad \longrightarrow \quad T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

La magnitud que da la rapidez con que se desintegra una muestra radiactiva es la **actividad**:

$$A(t) = -\frac{dN(t)}{dt} = \underbrace{\lambda N_0}_{A_0} e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} = \lambda N(t)$$

La actividad tiene dimensiones de $[T^{-1}]$ y su unidad en el sistema internacional es el becquerelio:

$$1 \text{ Bq} = 1 \frac{\text{desintegración}}{\text{s}}$$

Por razones históricas se usa también el Curio:

$$1 \text{ Curio} = 1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

2.2.1. Radiactividad natural

El fenómeno de emisión radiactiva no ha sido inventado por el hombre sino descubierto. Todos los elementos, excepto los más ligeros, se produjeron por reacciones nucleares en el interior de las estrellas. Como resultado de esas reacciones se produjeron algunos elementos estables pero la mayoría eran radiactivos. Aquéllos productos radiactivos con semividas cortas (en la escala de tiempos del universo) han ido decayendo a elementos estables, pero de algunos con semividas largas ($T_{1/2} > 10^5$ años), a pesar de ir decayendo, todavía queda una fracción de los creados originalmente y están en la naturaleza formando parte de nuestro entorno. Los más interesantes son:

- ^{238}U (radiactivo α) con $T_{1/2} = 4,47 \cdot 10^9$ años
- ^{235}U (radiactivo α) con $T_{1/2} = 7,04 \cdot 10^8$ años
- ^{232}Th (radiactivo α) con $T_{1/2} = 1,41 \cdot 10^{10}$ años

Los descendientes de estos tres también son radiactivos β y/o α y dan lugar a la aparición de las tres series radiactivas naturales. Cada una de ellas empieza en los nuclidos mencionados arriba y termina en isotopos del *Pb*.

Además de los isótopos radiactivos naturales hay muchos isótopos radiactivos artificiales. Estos han sido creados por el hombre, bien a propósito con fines médicos o bien como productos indeseados de los procesos de fisión nuclear que se producen en las centrales nucleares.

2.3. Efectos biológicos de la radiación

Todos hemos escuchado alguna vez que la radiación es perjudicial para los seres vivos, pero ¿de qué forma recibimos esa radiación? y ¿por qué es peligrosa?

Dependiendo de donde esté la fuente radiactiva hay 2 formas de agresión de las radiaciones al ser humano:

Irradiación: cuando la fuente radiactiva es externa y la radiación llega al ser vivo a través del aire y otros materiales. En esta situación la radiación más peligrosa es la γ ya que ésta puede viajar largas distancias en aire sin problemas y afectar a un ser vivo lejos de donde se ha producido la emisión radiactiva. Las emisiones α sólo viajan unos pocos centímetros en aire y basta un papel para pararlas.

Contaminación: cuando la fuente radiactiva se incorpora al ser vivo por medio de inhalación, ingestión... En este caso, las radiaciones más peligrosas son la α y la β . Éstas viajan poco en el tejido vivo y, por tanto, dejan toda su energía en los tejidos vivos por los que pasan pudiendo producir daños en el interior del organismo.

El peligro de la radiación reside en que transmite energía suficiente como para ionizar la materia. En el caso de la molécula de agua (aproximadamente el 80 % de la masa del cuerpo humano), la radiación la descompone en radicales OH^- y H^+ , ambos son altamente reactivos y pueden combinarse y romper células gigantes de los seres vivos dando lugar a efectos:

Somáticos: Una persona expuesta a radiación sufre él sólo las consecuencias. Por ejemplo, un enfermo sometido a radioterapia sufre la caída del pelo. La exposición a los rayos ultravioleta del Sol sin protección causa cancer de piel, etc.

Genéticos: La radiación afecta al código genético y durante generaciones se producen mutaciones en la familia.

Las magnitudes que se usan para cuantificar la radiación recibida y su efecto biológico son:

Dosis absorbida D : es la energía depositada por la radiación por unidad de masa.

$$1 \text{ rad} = 100 \frac{\text{erg}}{\text{g}} = 0,01 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$1 \text{ Gray} = 1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

Dosis equivalente H : es la dosis absorbida multiplicada por un factor que tiene en cuenta la peligrosidad del tipo concreto de radiación recibida.

$$H = D \cdot Q$$

Q es el **factor de calidad**. La unidad de dosis equivalente es el *rem* o eficacia biológica relativa.

| Radiación | Q |
|--------------------|-----|
| X, β, γ | 1 |
| α | 10 |
| n (lentos) | 3 |
| n (rápidos) | 10 |

Otra unidad es el Sievert.

$$1 \text{ Sievert} = 1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

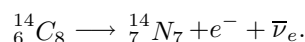
3. Aplicaciones

3.1. Datación con ^{14}C .

El ^{14}C es un emisor β^- de semivida $T_{1/2} = 5730$ años y se forma de un modo natural por efecto de los rayos cósmicos sobre las capas altas de la atmósfera. La química del ^{14}C es igual que la de los 2 isótopos estables de C (^{12}C , ^{13}C) así que forma parte, en una proporción pequeña pero medible, de cualquier compuesto de carbono. En particular del CO_2 , que está distribuido uniformemente por la atmósfera y que, por tanto, se encuentra en todos los seres vivos al intercambiar éstos CO_2 con la atmósfera.

La actividad de 1 g de carbono natural, debido a la presencia en él de una pequeña fracción de ^{14}C , es de 16 desint./min = $\frac{16}{60} Bq$.

En el caso de los seres vivos (personas, animales o plantas), mientras respiran incorporan a su organismo el ^{14}C que hay en el aire. Por otro lado, parte del ^{14}C que hay dentro del organismo va desapareciendo por desintegración radiactiva:



Mientras el ser vivo respira estos dos efectos se encuentran equilibrados y el resultado es que la cantidad de ^{14}C en el organismo es siempre la misma y su actividad es siempre $\frac{16}{60} Bq$. Cuando el ser vivo muere, se detiene la incorporación de ^{14}C pero continúa el proceso de desintegración radiactiva. El efecto neto es que cada vez hay menos ^{14}C y su actividad va disminuyendo de acuerdo con la ley que ya vimos: $A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$.

Midiendo la actividad actual, $A(t)$, conocida la actividad cuando murió, $\frac{16}{60} Bq$, y sabiendo que $\lambda = \frac{\ln 2}{5730}$ (años $^{-1}$), se puede determinar cuánto tiempo t ha transcurrido desde que ese material dejó de intercambiar C con la atmósfera.

3.1.1. Ejemplo

Una viga de madera descubierta en unas excavaciones tiene un 20 % del ^{14}C hallado en el carbono atmosférico. ¿Qué edad tiene la viga?

$$A(t) = 0,2A_0$$

$$0,2 = e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} t} \quad t = 5730 \text{ años} \frac{\ln 5}{\ln 2} = 13305,6 \text{ años}$$

3.2. Otras aplicaciones

- La radioterapia y los radiofármacos. Los primeros se utilizan para tratar el cancer. Los segundos se utilizan para conocer la absorción y eliminación de sustancias en algún órgano, tras ser administrados a un organismo.
- La γ -grafía es como radiografía pero con mayor poder de penetración que los rayos-X. Se usa, entre otras cosas, para revisar soldaduras en grandes planchas de acero como las usadas en la construcción de buques, aviones, oleoductos, gaseoductos, etc.

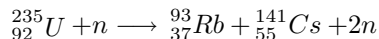
4. Fisión y fusión nucleares

4.1. Fisión nuclear

Fisión es la ruptura de un núcleo pesado en dos núcleos más ligeros. Como los núcleos más ligeros están más ligados en una cantidad del orden de 1 MeV /nucleón, en el proceso de fisión (se rompe un núcleo pesado con unos 200 nucleones) se liberan del orden de 200 MeV de energía por cada átomo fisionado. Los tamaños de los 2 fragmentos pueden variar, pero típicamente uno tiene $A \approx 90$ y el otro $A \approx 140$. La mayor parte de la energía liberada en la fisión se la llevan los fragmentos en forma de energía cinética, pero una parte pequeña

($\approx 20\%$) se la llevan los neutrones emitidos en el proceso de fisión.

Ejemplo:



Por supuesto, para un núcleo fisionable hay varios caminos o canales por los que se puede producir la fisión. El número de neutrones que se producen en cada fisión también depende del canal y puede variar, pero en promedio es 2.5. Cada neutron puede después inducir nuevas fisiones y se produce lo que se denomina una *reacción en cadena*. Esta reacción en cadena puede ocurrir sin control alguno (armas nucleares) o en condiciones controladas (reactor nuclear).

Como ya hemos mencionado, la mayor parte de la energía liberada se emplea en dar energía cinética a los fragmentos. Éstos no viajan muy lejos en el combustible antes de disipar toda su energía cinética en forma de calor. Ese calor se puede usar para subir la temperatura de agua hasta evaporarla y el vapor que resulta se usa de forma convencional para mover una turbina y generar electricidad.

Hay varios problemas para que funcione correctamente un reactor:

Combustible: ${}^{235}\text{U}$ es escaso en la naturaleza (0.7% del U natural). Hay que aumentar esa proporción por medio del *enriquecimiento* (proceso de difusión).

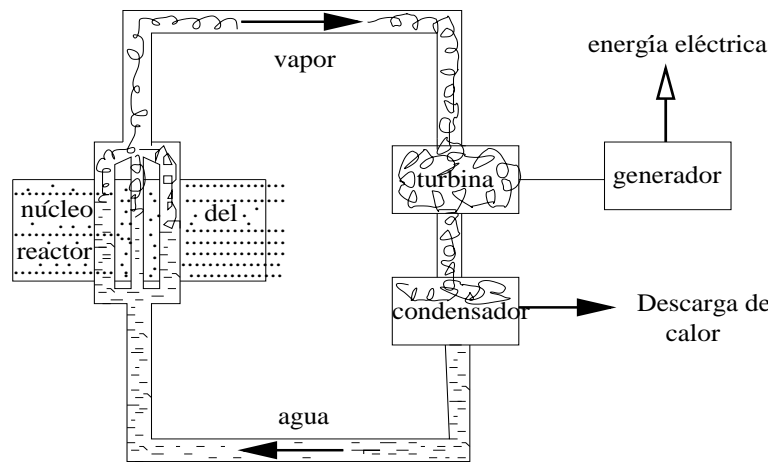
Otro material apropiado es ${}^{239}\text{Pu}$ que no existe en la naturaleza, hay que producirlo.

Agente transmisor de la fisión: Son los neutrones. Por lo general los n producidos son muy rápidos y son poco eficientes para fisionar el combustible, hay que frenarlos (moderar su velocidad) para que sean más efectivos. Se rodea el combustible por un material que permita a los n colisionar con sus átomos y perder velocidad. El mejor moderador es el *agua pesada* D_2O (donde D es el deuterio que es el isótopo ${}^2_1\text{H}_1$).

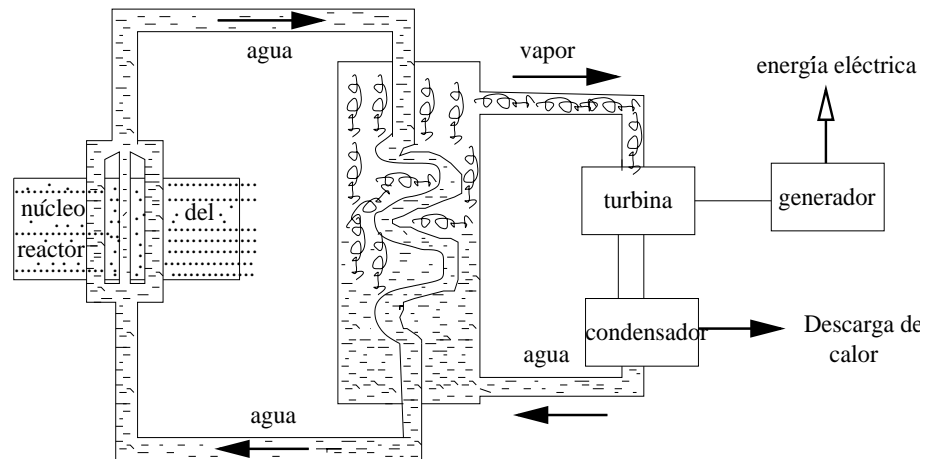
Control de la reacción en cadena: Hay que controlar el número de n susceptibles de dar lugar a fisiones. Para que la reacción en cadena se mantenga controlada. Por cada n que origine una fisión sale 1 n , es el denominado **estado crítico**. Si se originan menos de 1 n el estado se dice **subcrítico**, y en este caso la reacción en cadena se va parando. Si se origina más de 1 n por fisión, la reacción en cadena se dispara y cada vez se genera más y más energía de manera incontrolada. Para controlar la reacción en cadena se introducen en el combustible unas barras de control que absorben n y cuya penetración en el combustible se va variando de forma que se mantenga al reactor en estado crítico.

Extracción de la energía: El calor generado en el reactor se debe extraer para convertirlo en energía eléctrica. Hay varios modos de hacerlo en un reactor nuclear, veamos brevemente cómo se hace en dos tipos de reactores: el de agua hirviendo y el de agua a presión:

1. Reactores de agua hirviendo.



2. Reactores de agua a presión.

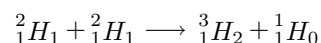


Otros problemas de los reactores nucleares no relacionados directamente con la generación de energía son:

- Residuos radiactivos: almacenamiento, incineración,...
- Resistencia ante agentes externos: terremotos, ataques,...
- Refrigeración: contaminación térmica.

4.2. Fusión

Se llama fusión al proceso por el cuál dos núcleos ligeros se combinan para dar lugar a uno más pesado. La energía liberada es de aproximadamente 1 MeV por nucleón en la reacción



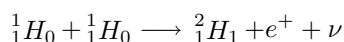
Para que tenga lugar la reacción hay que acercar los 2 deuterios lo suficiente para que puedan fusionar, esto es, hay que vencer las fuerzas coulombianas

de repulsión entre los núcleos (aproximadamente de 0.5 MeV). Pero ¿cómo se puede vencer esa barrera?

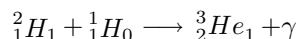
Por procedimientos únicamente térmicos existe la equivalencia energía-temperatura siguiente: $0,25 \text{ MeV} \approx 10^9 \text{ K}$. Estas condiciones no se pueden dar en un laboratorio. Se dan en el núcleo de las estrellas. En el Sol se dan esas condiciones y se convierte en la fuente energética que permite la vida en la Tierra¹.

Veamos los procesos de fusión dentro del Sol. El proceso básico, que puede tener lugar por varios canales distintos, es la fusión de 4 átomos de H para dar un átomo de He y 2 positrones. Partimos de que en el Sol hay fundamentalmente hidrógeno.

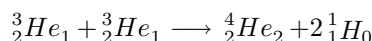
1. Primero se forma deuterio:



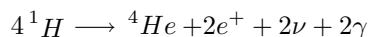
2. Ahora el deuterio se combina con otro hidrógeno:



3. Finalmente:



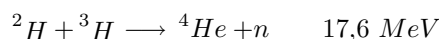
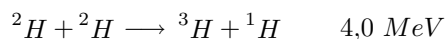
La reacción completa se puede escribir:



Cada reacción de fusión libera aproximadamente 26.7 MeV de energía.

Éste es el que se denomina ciclo **protón-protón**.

Se puede producir energía por fusión en un reactor nuclear. Las reacciones más interesantes son:



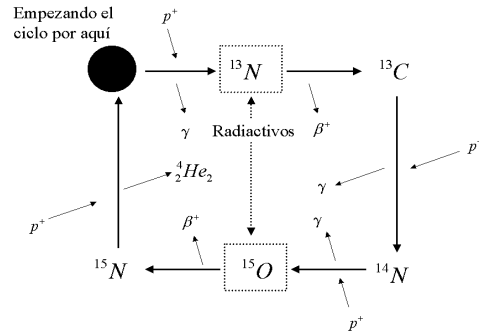
Un problema tecnológico grave es el confinamiento de los núcleos que van a fundir, teniendo en cuenta que hay que retenerlos a temperaturas del orden de 10^9 K . El procedimiento habitual es el **confinamiento magnético** en el que se utilizan campos magnéticos para confinar el plasma de partículas cargadas.

Otro procedimiento es el **confinamiento inercial** en el que láseres muy potentes empujan a los núcleos que queremos que fundan unos contra otros obteniéndose la fusión.

¹Tal como la conocemos ahora.

4.3. Ciclo del carbono

Es una alternativa al ciclo protón-protón, en él se parte del ^{12}C y después de varios procesos de cambio se vuelve al ^{12}C :



En el ciclo no se consume ni produce ^{12}C , pero su presencia permite que las reacciones que generan ^4He se den a un ritmo superior al del ciclo protón-protón. Como la repulsión $^1\text{H} - ^{12}\text{C}$ es mayor que la de $^4\text{He} - ^1\text{H}$ se necesitan temperaturas mayores que para el ciclo protón-protón.

En el caso del Sol, cuando todo el ^1H se convierte en ^4He , el sol se contraerá y aumentará su temperatura para permitir que se produzca fusión de ^4He en procesos como $3^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C}$ y así seguirá hasta que se formen los núcleos más estables cercanos al ^{56}Fe .