

INTERACCIÓN NUCLEAR.

Radiactividad.

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

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

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

Al poco tiempo de descubrirse la radiactividad del uranio, se descubrieron nuevos elementos radiactivos: torio, polonio, radio y actinio. En la actualidad se conocen más de cuarenta elementos radiactivos.

Radiaciones alfa, beta y gamma.

Las distintas radiaciones emitidas por las sustancias radiactivas se clasificaron inicialmente, según el poder de penetración, con los nombres de radiación α , β y γ (de menos a más penetrante).

Hoy en día conocemos las características de las distintas radiaciones y sabemos que se originan en el núcleo atómico.

Radiación alfa	Radiación beta	Radiación gamma
<p>Son núcleos de helio formados por dos protones y dos neutrones. Son absorbidas en pocos centímetros de aire. Su velocidad es inferior a un 8% de la velocidad de la luz.</p>	<p>Son electrones rápidos (hasta un 99% de la velocidad de la luz) procedentes de neutrones que se desintegran en el núcleo dando lugar a un protón y un electrón. Pueden atravesar algunas décimas de milímetro de Al.</p>	<p>Son radiaciones electromagnéticas de mayor frecuencia que los rayos X.</p>

Desintegración radiactiva.

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

La desintegración radiactiva es un proceso aleatorio gobernado por leyes estadísticas. Si llamamos N al número de núcleos que aún no se han desintegrado en un tiempo t , el número de emisiones por unidad tiempo será proporcional al número de núcleos existentes:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad \text{Donde } \lambda \text{ es la } \mathbf{constante radiactiva}, \text{ característica de cada } \mathbf{isótopo} \text{ radiactivo.}$$

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

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad \text{Donde } N_0 \text{ es el número de núcleos sin desintegrar en el instante inicial.}$$

El número de emisiones de una sustancia por unidad de tiempo recibe el nombre de actividad, A , o velocidad de desintegración. Su unidad en el SI es el becquerel (Bq). De las ecuaciones anteriores se deduce:

$$A = \left| \frac{dN}{dt} \right| = \lambda N \quad A = A_0 e^{-\lambda t} \quad \text{Donde } A_0 = \lambda N_0: \mathbf{Actividad} \text{ en el instante inicial.}$$

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

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \quad \text{de donde} \quad T = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

La actividad también se puede medir en curies: $1 \text{ curie} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$.

Se define la **vida media**, τ , de un isótopo radiactivo como el tiempo medio que tarda un núcleo al azar en desintegrarse.

$$\tau = \frac{1}{\lambda} = \frac{T}{\ln 2}$$

El número de núcleos radiactivos de una muestra se reduce a tres cuartas partes de su valor inicial en 38h. Halla: a) la constante radiactiva; b) el periodo de semidesintegración.
($\lambda = 2,1 \cdot 10^{-6} \text{ Bq}$; $T = 3,82 \text{ días}$)

El número de núcleos de una muestra radiactiva se reduce a siete octavas partes de su valor inicial en 1,54 días. Halla: a) la constante radiactiva; b) el periodo de semidesintegración.
($1,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/s}$; 8 días)

Efectos biológicos y aplicaciones de la radiactividad.

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

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

Los efectos de la radiactividad no siempre son perjudiciales. Si se emplea en la dosis y la forma adecuada, la radiactividad tiene muchas utilidades en distintos campos. La mayoría de las aplicaciones se basan en dos hechos: que los isótopos se comportan exactamente igual desde el punto de vista químico, que los isótopos estables del mismo elemento, mezclándose con ellos en cualquier proceso físico, químico o biológico; además mediante detectores adecuados es posible localizar la situación de los átomos cuyos átomos son radiactivos. Normalmente se añade al elemento natural una pequeña proporción del radioisótopo correspondiente y se sigue su trayectoria en un proceso determinado.

En **medicina** se utiliza para:

- el tratamiento y diagnóstico del cáncer,
- el estudio de órganos,
- la esterilización de material quirúrgico,
- asimilación de sustancias...

En la **industria**, se emplean:

- radiografías para examinar planchas de acero, soldaduras y construcciones,
- circulación de petróleo por oleoductos...

En **química**, se emplea para:

- investigar mecanismos de reacción,
- fabricar productos químicos,
- análisis químico...

En **arqueología** se emplea para:

- datar restos antiguos.

En **otros campos**, se usa para:

- esterilizar especies nocivas en la agricultura,
- fabricar relojes de precisión y generadores auxiliares para satélites.
- conservación de alimentos,
- controlar las migraciones de algunas especies...
- conocer movimiento de agua y aire en atmósfera.

El Núcleo Atómico.

Todos los experimentos que se realizaron tras el descubrimiento de la radiactividad indicaron que las emisiones radiactivas no dependían del estado físico o químico de la

sustancia (por ejemplo, de si estaba pulverizada o si era atacada por ácidos). Es decir, la radiactividad se producía en el **núcleo atómico**.

Con los experimentos de Rutherford y el descubrimiento, en 1932, del neutrón (partícula de masa similar a la del protón y sin carga eléctrica), se determinó de forma definitiva la estructura del átomo.

Los átomos están constituidos por electrones que giran alrededor de un núcleo atómico. En el núcleo se concentra prácticamente toda la masa atómica (más del 99 %). En cambio, el volumen del núcleo es una parte muy pequeña del volumen atómico (10^5 veces más pequeño).

El núcleo está formado por protones y neutrones, partículas que denominamos **nucleones**. Un núcleo atómico se caracteriza por su **número atómico**, Z (número de protones del núcleo), y su **número másico**, A (número de nucleones del núcleo).

Es decir, el núcleo atómico está formado por Z protones y $(A - Z)$ neutrones. Así pues, el núcleo posee una carga eléctrica positiva $+Ze$.

Como los electrones de los átomos, los núcleos presentan distintos niveles cuánticos de energía.

Cuando un núcleo pasa de un estado excitado a otro menos energético, emite energía en forma de rayos γ y rayos X. Es un proceso análogo a la emisión de radiación en las transiciones electrónicas. Los valores de los niveles energéticos nucleares son del orden del megaelectronvoltio (MeV), mientras que los valores de los niveles electrónicos son del orden del electronvoltio (eV).

Por acuerdo de la IUPAC se adoptó como unidad de masa atómica la doceava parte de la masa del isótopo de carbono 12, cuyo valor viene dado por:

$$1u = \frac{1}{12} M(^{12}\text{C}) = \frac{1}{12} \frac{12 \cdot 10^{-3} \text{ Kg} / \text{mol}}{6,0225 \cdot 10^{23} \text{ at} / \text{mol}} = 1,6604 \cdot 10^{-27} \text{ Kg}$$

Fuerzas Nucleares.

A distancias muy pequeñas (del orden de $10^{-15} \text{ m} = 1 \text{ fermi}$), la fuerza electrostática de repulsión entre las partículas del núcleo son muy intensa y no se compensan con las de atracción gravitatoria. Debe existir un nuevo tipo de fuerzas, además de las fuerzas gravitatoria y electromagnética ya conocidas. Son las llamadas fuerzas nucleares, de muy corto alcance pero muy intensas.

Fuerza Nuclear Fuerte.

- Responsable de la cohesión del núcleo.
- Es una fuerza atractiva que se manifiesta entre nucleones con independencia de su carga eléctrica.
- Es de corto alcance: es nula para distancias superiores a 10^{-15} m .
- A distancias muy cortas, es superior a cualquier otro tipo de fuerza. Por sí sola, compensa la fuerte repulsión electrostática entre los protones del núcleo.

Fuerza Nuclear Débil.

- Responsable de la desintegración β de los núcleos.
- Se manifiesta sobre todo en partículas no sometidas a la acción de la fuerza nuclear fuerte.
- Es de corto alcance: es nula para distancias superiores a 10^{-17} m.
- A distancias muy cortas, donde es máxima, supera en intensidad a la fuerza gravitatoria, pero es más débil que otras interacciones.

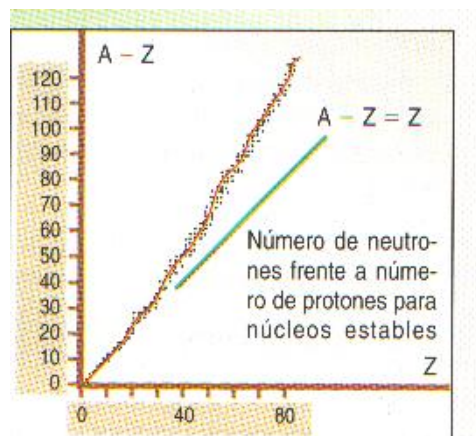
DATOS:

Partícula	Carga Eléctrica (Culombios)	Masa (Kg.)
Electrón	$-1,602 \cdot 10^{-19}$	$9,1 \cdot 10^{-31}$
Protón	$+1,602 \cdot 10^{-19}$	$1,673 \cdot 10^{-27}$
Neutrón	0	$1,675 \cdot 10^{-27}$

Estabilidad Nuclear.

Si se representa gráficamente el número de neutrones contenido en el núcleo, en función de Z, para los núcleos estables, se observa una distribución como la de la gráfica.

Se desprende de esta que para masas pequeñas, $Z \leq 40$, hay una tendencia a que el número de neutrones sea igual al de protones. Para masas mayores se incrementa el número de neutrones. Esto es debido, posiblemente, a que una acumulación de carga positiva en el núcleo haría disminuir la energía de enlace debido a la repulsión electrostática.



De los trabajos de Everling y otros se deducen cierto número de resultados relativos a la estabilidad de los núcleos:

- Los núcleos de número atómico impar tienen sólo uno o dos isótopos estables.
- Los núcleos de Z impar y A par son inestables salvo 5 excepciones: H-1, Li-6, B-10, N-14 y Ta-180.
- En cualquier grupo de isóbaros con A y Z pares existen solamente uno o dos núcleos estables respecto a las transiciones β .

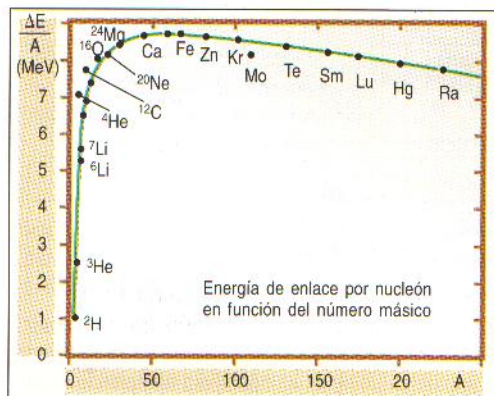
Energía de Enlace.

Si se quiere romper un núcleo para aislar sus nucleones, hay que aportar una cierta energía. Esta energía coincide con la energía liberada al formarse el núcleo a partir de sus componentes y recibe el nombre de energía de enlace.

Se observa que la energía de enlace por nucleón aumenta rápidamente desde $A=1$ hasta $A=20$, luego más despacio hasta alcanzar un valor máximo de 8,8 MeV alrededor de $A=56$. Este valor va decreciendo ligeramente hasta 7,5 MeV para los elementos más pesados

La energía de enlace de un núcleo es la liberada cuando sus nucleones aislados se unen para formar el núcleo.

El núcleo es mucho más estable (menos energético) que el conjunto de sus nucleones aislados, ya que al formarse se libera energía.



Según la mecánica relativista, un cambio de energía está asociado a un cambio de masa. Así, los nucleones pierden parte de su masa al formarse el núcleo. Experimentalmente se comprueba que la masa de un núcleo cualquiera formado por Z protones y A-Z neutrones es siempre inferior a la suma de las masas de los protones y los neutrones libres. La diferencia, denominada defecto de masa, viene dada por:

$$\Delta m = (Zm_p + (A - Z)m_n) - M_n$$

La energía asociada al defecto de masa es la energía de enlace,

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

La energía de enlace por nucleón es el cociente entre energía de enlace y el número másico $\frac{\Delta E}{A}$. Cuanto mayor es este cociente, más estable es el núcleo. Su valor medio es aproximadamente de 8,3 MeV

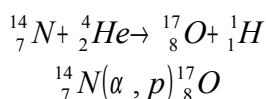
Calcula en MeV la energía equivalente a 1 u.

¿Cuál es la abundancia relativa de los dos isótopos de la plata, de números másicos 107 y 109, si la masa atómica del elemento es 107,88? ¿Cuál es la composición de cada uno de los núcleos? El número atómico de la plata es 47. (P.at.Ag-107=106,9051/Ag-109=108,9048)

La masa atómica del isótopo hierro 56 es 55,9394 u y su número atómico es Z=26. Halla: a) el defecto de masa; b) la energía de enlace. ($m_p=1,0073$ u; $m_n=1,0087$ u) Nota: El equivalente energético de la unidad de masa atómica, 1 u, vale: $E = 931$ MeV.

Reacciones Nucleares.

En 1919 Rutherford bombardeó núcleos de nitrógeno con partículas α y observó cómo estas partículas eran absorbidas por el núcleo, que se transformaba en otro distinto y emitía un protón. Fue la primera reacción nuclear provocada por el ser humano:



En toda reacción nuclear, la suma de los números atómicos y la suma de los números másicos se mantienen constantes.

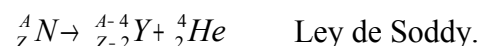
Reacciones Nucleares y Radiactividad.

Cuando un núcleo es inestable, tiende a transformarse de forma que los productos resultantes sean más estables. El proceso es una reacción nuclear en la que se libera energía.

Los núcleos radiactivos son muy inestables. De forma espontánea producen emisiones radiactivas según distintas reacciones nucleares.

Emisión de partículas α .

Un núcleo de helio, formado por dos protones y dos neutrones, abandona el núcleo padre. Así el número másico disminuye en cuatro unidades y el atómico en dos.



Emisión de partículas β .

Un neutrón del núcleo padre se transforma en un electrón (partícula β), un protón y un antineutrino (partícula sin masa ni carga): $n \rightarrow \beta^- + p^+ + \bar{\nu}_e$. El número másico no se altera y el número atómico aumenta en una unidad.



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

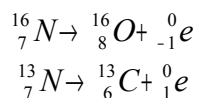
En la desintegración radiactiva del torio 232 se emite una partícula α seguida de una partícula β . Escribe las reacciones nucleares sucesivas que tienen lugar. (Número atómico del Th $Z=90$)

Radiactividad Artificial.

Las reacciones nucleares originan muy a menudo átomos radiactivos con propiedades similares a las de los descritos en el caso de la radiactividad natural.

Los átomos radiactivos procedentes de una reacción nuclear se desintegran emitiendo radiación β o positrones. Por tanto, un átomo radiactivo artificial se transforma siempre en otro isóbaro, cuyo número atómico es superior o inferior en una unidad al del átomo original.

La regla que rige uno u otro tipo de emisión es la siguiente: un átomo radiactivo artificial que es más pesado que el promedio de sus isótopos, emite electrones, mientras que si es más ligero se transforma emitiendo positrones.



Familias Radiactivas.

Actualmente se conocen tres series radiactivas constituidas por isótopos naturales:

- La del uranio-radio: va desde el uranio 238 hasta el plomo 206. $A=4n+2$
- La del uranio-actinio: va desde el uranio 235 hasta el plomo 207. $A=4n+3$
- La del torio: va desde el torio 232 hasta el plomo 208. $A=4n$

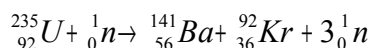
Existe una familia artificial, la del Neptunio, de número másico: $A=4n+1$
Esta va desde el Np-237 al Bi-209.

Fisión nuclear.

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

La fisión nuclear es una reacción nuclear en la que un núcleo pesado se divide en dos más ligeros al ser bombardeado con neutrones. En el proceso se liberan más neutrones y gran cantidad de energía.

En 1938, los físicos alemanes Hahn y Strassmann consiguieron dividir el núcleo de uranio 235 según la reacción:



Los productos de esta reacción nuclear presentan un defecto de masa de 0,2154 u, que corresponde a una energía liberada de unos 200 MeV por núcleo de uranio 235.

A pesar de que el uranio 235 es energéticamente más inestable que sus productos de fisión, no se fisiona de forma espontánea. Es necesaria una energía de activación que se obtiene de la captura de un neutrón por el núcleo.

Los núcleos más adecuados para la fisión son los de elevado peso atómico. Los isótopos más utilizados son: uranio 235 y plutonio 239.

Los neutrones liberados por la fisión de un núcleo pueden fisionar otros núcleos dando lugar a una reacción en cadena. En 1942 Fermi produjo la primera fisión nuclear en cadena controlada.

Si la reacción en cadena se quiere controlar, se deben introducir materiales que absorban el exceso de neutrones y evitar que la reacción prosiga de forma explosiva. Así se hace en centrales y motores de buques y satélites.

Si no se controla la reacción, esta se verifica de forma explosiva. Esto ocurre en las bombas atómicas.

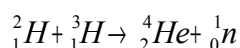
La fisión nuclear tiene un alto rendimiento energético (con 1 Kg de uranio se obtiene la misma energía que con 2000 toneladas de petróleo). Sin embargo, la fisión presenta el riesgo de contaminación radiactiva y la dificultad de eliminar de forma rápida y segura los residuos.

Fusión Nuclear.

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

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

Un ejemplo de reacción de fusión lo constituye la unión del deuterio y el tritio (isótopos del hidrógeno) para formar helio 4.



En esta reacción los productos presentan un defecto de masa de 0,0189 u, que corresponde a una energía liberada de 17,6 MeV por átomo de helio 4.

Tal como sucede en la fisión, para iniciar un proceso de fusión nuclear es necesaria una energía de activación. En el caso de la fusión, la energía para que los núcleos se unan venciendo las repulsiones electrostáticas es proporcionada por una energía térmica muy elevada (unos 1.000.000 °C)

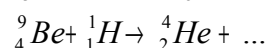
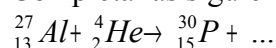
Los núcleos más ligeros son los más apropiados para producir la fusión nuclear.

Las reacciones de fusión tienen lugar de forma natural en el Sol y otras estrellas, gracias a las altas temperaturas de su interior. De forma artificial, en cambio, el ser humano sólo ha conseguido la fusión en cadena de forma explosiva.

Aún no se ha conseguido la fusión nuclear de forma controlada y rentable, debido a la dificultad de confinar los reactivos que a temperaturas tan altas están en estado de plasma. Actualmente se estudia el confinamiento magnético del plasma.

El hombre ha conseguido una fusión nuclear no controlada en la bomba de hidrógeno (bomba H). Mediante una bomba atómica de fisión se alcanza la alta temperatura necesaria para llevar a cabo la reacción de fusión.

Completa las siguientes reacciones nucleares:



¿Qué cantidad de energía se libera en la reacción de fusión ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He}$. (H-2=2,0141)

Armas y reactores nucleares.

Los neutrones que se emiten en la fisión del uranio-235 hacen posible una reacción en cadena. La condición para que esto ocurra es que en promedio al menos un neutrón de los producidos en cada fisión produzca una nueva fisión. Si los neutrones escapan o son absorbidos por otros materiales, y sólo unos pocos producen la fisión, la reacción se detiene. Si exactamente un neutrón de cada fisión produce otra fisión, la reacción se mantiene y se libera energía de manera continua; éste es el fundamento de un reactor **nuclear**. Si en cada fisión se produce más de un neutrón capaz de producir nuevas fisiones, la reacción en cadena se desarrolla con gran velocidad, y la liberación de energía es tan grande y tan rápida que se produce una explosión gigantesca; éste es el fundamento de una **bomba atómica**.

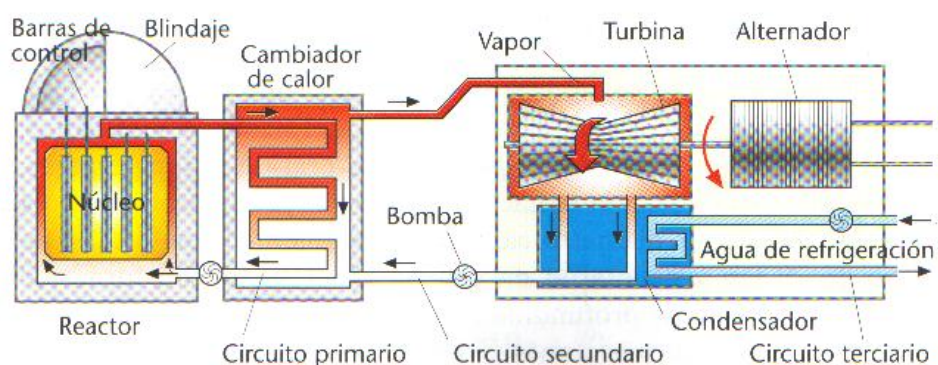
Para que los neutrones no escapen y puedan ser atrapados por los núcleos de uranio-235, debe haber una cantidad suficiente de material fisionable. A esta cantidad mínima, necesaria para producir la reacción en cadena, se le denomina masa **crítica**.

El uranio natural contiene solamente un 0,7 por 100 de uranio-235, el 99,3 por 100 restante es uranio-238. La fabricación de bombas atómicas exige concentrar el uranio-235 hasta un 99 por 100, lo que requiere instalaciones muy sofisticadas y costosas.

En una bomba atómica el material fisionable está separado en dos masas subcríticas que se unen, para sobrepasar la masa crítica, en el momento de la explosión. Una bomba atómica es un ejemplo de fisión incontrolada.

Reactores nucleares de fisión

Un reactor nuclear es un dispositivo que controla el crecimiento de la reacción en cadena y produce grandes cantidades de energía; es un ejemplo de fisión controlada. En esencia, una central nuclear, como una central térmica, utiliza la energía calorífica del reactor para producir vapor de agua a presión, que al expandirse en la turbina del alternador produce energía eléctrica.

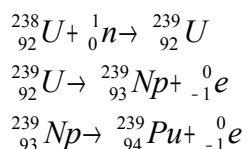


El uranio que se usa en los reactores nucleares es uranio natural o uranio enriquecido que contiene del 3 al 5 por 100 de uranio-235. Por eso en un reactor no puede producirse explosiones nucleares similares a una bomba atómica.

La reacción en cadena se regula mediante **barras de control**, fabricadas con materiales que absorben neutrones. Se utilizan boro y cadmio, que capturan neutrones con facilidad y regulan, por tanto, el número de neutrones que pueden producir la fisión y la reacción en cadena. Las barras de control se insertan entre las varillas que contienen el combustible nuclear. Cuando se insertan por completo detienen la reacción en cadena y “paran” el reactor.

La reacción de fisión del uranio-235 se produce con neutrones “lentos”. Sin embargo, los producidos en la **fisión** son neutrones “rápidos” (tienen más energía de la necesaria y no son atrapados por el núcleo). Por ello, es necesario utilizar un **moderador** que disminuya su velocidad. Se emplean para este fin agua, agua pesada (D_2O), berilio y grafito.

El material fisionable empleado en los reactores nucleares contiene porcentajes muy pequeños de uranio-235. Es rico en uranio-238, y este isótopo del uranio tiene una propiedad importante: es capaz de capturar los neutrones rápidos y convertirse en plutonio-239, que es fisionable como el uranio-235, mediante las siguientes reacciones:



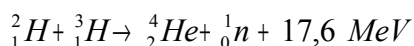
Un **reactor reproductor** o **regenerador** es aquel que está especialmente diseñado para producir más plutonio-239 que el uranio-235 que consume. Los neutrones lentos producen la **fisión** del uranio-235 y los rápidos convierten el uranio-238, que no es fisionable, en plutonio-239 que sí es fisionable. Como las reservas de uranio-235 no son muy grandes, estos reactores reproductores permitirán garantizar la existencia de materiales fisionables durante muchos siglos. La contrapartida es que el plutonio-239 también puede utilizarse en la fabricación de armas nucleares y su producción en las centrales nucleares es difícil de controlar.

Reactores de fusión nuclear.

La unión de núcleos ligeros para producir núcleos mayores también va acompañada de la emisión de grandes cantidades de energía. Pero para vencer la repulsión electrostática entre los núcleos que se quieren fusionar es necesario comunicarles grandes energías, hay que conseguir temperaturas muy elevadas. Como las fuerzas de repulsión coulombianas son proporcionales a la carga eléctrica de los núcleos, los átomos de hidrógeno son los más adecuados para conseguir la fusión.

A temperaturas tan elevadas, los átomos pierden electrones y se forma un gas, que consta de cationes y electrones, llamado plasma.

De entre todas las reacciones de fusión, la que parece más fácil de conseguir es la reacción deuterio + tritio:



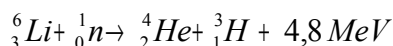
Para lograr la fusión es necesario calentar un plasma a temperaturas del orden de 10^8 K y conseguir que alcance una densidad del orden de 10^{20} partículas/ m^3 , durante un tiempo de unos segundos. Hay que confinar el plasma en un recipiente sin paredes, pues ningún material soportaría esas temperaturas. Se investiga en dos alternativas: **confinamiento magnético** y **confinamiento inercial**.

En el confinamiento magnético el plasma se confina mediante campos magnéticos y eléctricos. Las dos configuraciones más estudiadas se denominan Tokamak y *Stellarator*.

El confinamiento inercial se basa en conseguir densidades enormes (cien veces mayores que las normales del estado sólido) durante tiempos muy pequeños. Se puede conseguir calentando pequeñas cápsulas de deuterio-tritio mediante intensísimos rayos láser.

La energía de fusión presentará indudables **ventajas**:

- La materia prima es abundante y barata. En el agua del mar hay suficiente deuterio para abastecer a la humanidad durante miles de millones de años. El tritio se obtiene bombardeando litio con los neutrones procedentes de la fusión:



- Los reactores de fusión presentarán menos problemas con los residuos radiactivos que los de fisión y serán más seguros.

Sin embargo, las dificultades científicas y tecnológicas que hay que resolver son enormes. Su uso a corto plazo parece imposible, nadie se atreve a aventurar cuándo se obtendrá energía a gran escala por fusión nuclear controlada. De momento, sólo se han obtenido grandes cantidades de energía por fusión incontrolada mediante *bombas de hidrógeno*. En ellas la energía necesaria para iniciar la fusión la suministra una bomba atómica.

Contaminación radiactiva. Medida y detección.

Los daños biológicos producidos por las radiaciones dependen de su energía y de los iones producidos a su paso. La radiación ultravioleta, los rayos X y las radiaciones radiactivas son las más peligrosas.

Con frecuencia se subestiman los peligros de las radiaciones debido a que, excepto para dosis muy grandes, sus efectos más peligrosos sólo se aprecian varios años después. Pero dosis altas de radiación pueden producir cáncer y lesiones en los cromosomas con efectos genéticos negativos irreversibles. El daño causado es siempre proporcional a la dosis recibida.

La irradiación a que están sometidos los seres vivos procede de la radiactividad natural, es decir, la que procede de la propia naturaleza, y la radiación artificial, procedente, de actividades humanas que producen núcleos radiactivos.

La radiactividad natural procede de las transformaciones radiactivas de materiales que componen la corteza terrestre y de las radiaciones que proceden del Sol, que constituyen la radiación cósmica.

De los núclidos existentes en la naturaleza, unos setenta son radiactivos, generalmente son núcleos pesados procedentes de las familias radiactivas naturales. Destacan por su importancia radiactiva el radio-224, radio-226, radón-220, radón-222, potasio-40 y rubidio-87.

La radiación cósmica forma a su paso por la atmósfera tritio, carbono-14, fósforo-32, argón-39, etc.

La radiactividad artificial procede de explosiones nucleares, reactores nucleares, usos médicos de fuentes radiactivas, etc.

En el interior del organismo de los seres vivos también existen elementos radiactivos, incorporados por los alimentos, el agua y el aire. Los más importantes son el potasio-40, radio-226, radio-228 y uranio-238. Al fumar, por ejemplo, se inhalan plomo-210 y polonio-210.

Cuando se estudian los materiales radiactivos, la actividad del material se expresa en desintegraciones por segundo. La unidad de actividad en el SI es el **becquerel** (Bq), que corresponde a una desintegración por segundo.

Sin embargo, lo que realmente interesa son los efectos biológicos y físicos producidos por las radiaciones, y éstos dependen de las dosis de radiación recibidas. La unidad en el SI de dosis de radiación es el **sievert** (Sv).

Un sievert es la cantidad de cualquier radiación que produce el mismo efecto biológico que el producido por la absorción de un julio de rayos X o rayos gamma por kilogramo de materia.

Un sievert equivale a 100 rem, que es una unidad anterior muy utilizada.

Según la reglamentación española, la dosis máxima admisible para personas profesionalmente expuestas a este tipo de radiaciones es de 5 rem, y de 0,5 rem para la población en general.

Para dar idea de la peligrosidad relativa de las distintas fuentes de radiación, se indican a continuación las dosis medias aproximadas de radiación recibidas por una persona en un año:

Rayos cósmicos	30 mrem
Materiales terrestres de las rocas, suelos y materiales de construcción	35 mrem
Interior del cuerpo	25 mrem
Trabajo, ocio, consumo, pruebas nucleares, radiofármacos, etc	40 mrem
Rayos X de uso médico	90 mrem
Central nuclear con sistemas de protección adecuados	01 mrem
Esfera luminosa del reloj	02 mrem
Televisor en color	01 mrem

Se deduce de lo anterior, que junto a un temor lógico a las radiaciones radiactivas, se produce quizá un uso excesivo de los rayos X. Toda exposición a los rayos X también es peligrosa.

Si bien nuestros sentidos no pueden detectar las radiaciones, sí puede hacerse con instrumentos adecuados. Se emplean emulsiones fotográficas, pantallas de sulfuro de cinc que centellean cuando choca una partícula alfa, contadores Geiger basados en la propiedad ionizadora de las radiaciones y contadores de centelleo que transforman los destellos luminosos producidos por las radiaciones en impulsos eléctricos mediante circuitos electrónicos.

Desechos nucleares.

En circunstancias normales de funcionamiento, las emisiones radiactivas procedentes de centrales nucleares son de escasa significación si se comparan con las fuentes naturales de radiación, rayos cósmicos, elementos radiactivos naturales, etcétera. Sin embargo, aun cuando las centrales nucleares se doten de eficaces medidas de seguridad, la eliminación de los residuos radiactivos es un problema de primera magnitud.

Los reactores nucleares originan una gran variedad de productos de fisión, la mayor parte de los cuales son radiactivos. Son las cenizas del reactor. Algunos de estos productos tienen períodos de semidesintegración muy grandes, de miles de años, por lo que es necesario almacenarlos en lugares muy seguros. Sólo después de unos 600 años la actividad de los productos de fisión se reduce notablemente. En la actualidad, aunque no se conocen datos exactos, hay que almacenar miles de toneladas de estos desechos radiactivos.

Parece que la solución más viable para deshacerse de estos residuos consiste en enterrarlos a cientos de metros de profundidad, vitrificados, depositados en formaciones geológicas estables, sin probabilidad de terremotos, sin ciudades cercanas, en rocas que soporten el calor y la radiación (sal y rocas cristalinas) y en ausencia de aguas subterráneas que pudieran contaminarse.

La unificación de las interacciones fundamentales.

Todas las fuerzas de la naturaleza se reducen a cuatro interacciones fundamentales: **nuclear fuerte, electromagnética, nuclear débil y gravitatoria.**

La **interacción nuclear fuerte** es la más intensa, pero de muy corto alcance, 10^{-15} m, aproximadamente. Esta fuerza mantiene unidas las partículas que componen el núcleo del átomo. Los protones, debido a su carga, se repelerían si no estuvieran ligados por una fuerza intensa. Esta fuerza nuclear no se aprecia fuera del núcleo.

Sigue en intensidad la **fuerza electromagnética**. Es aproximadamente cien veces menor que la fuerza fuerte. Actúa sobre partículas cargadas y puede ser atractiva o repulsiva según sea el signo de las cargas. Es la responsable de que los átomos, moléculas y materia en general permanezcan unidos.

La **fuerza nuclear débil** tiene un radio de acción muy corto (unos 10^{-17} m). Su intensidad es 10^{-13} veces la de la interacción fuerte. Aparece en la desintegración beta de los núcleos radiactivos y actúa sobre los leptones.

La **fuerza gravitatoria** es la más conocida y la más débil de todas. Su intensidad es aproximadamente 10^{-39} veces la de la fuerza nuclear fuerte. Es universal y de atracción entre todas las masas. Teóricamente su alcance es ilimitado. Es la responsable de la estructura general del Universo.

Uno de los objetivos de la Física es unificar estas fuerzas de modo que todas sean manifestaciones de una sola interacción, de una fuerza única.

Newton demostró que la gravedad terrestre y la gravedad astronómica se deben a una sola fuerza, la fuerza gravitatoria.

Maxwell realizó la unificación electromagnética, demostrando que las fuerzas eléctricas y magnéticas tienen su origen en una sola interacción existente entre las partículas cargadas eléctricamente.

Steven Weinberg y Abdus Salam sostienen, en los años sesenta, que la interacción débil y la interacción electromagnética son aspectos diferentes de un mismo fenómeno básico, la interacción electro-débil.

Posteriormente, a partir de los trabajos de Murray Gell-Mann y George Zweig, la electrodinámica cuántica y la cromodinámica cuántica han unificado las interacciones fuerte, débil y electromagnética.

Probablemente, en el futuro se encontrará una teoría que unifique las cuatro fuerzas fundamentales, que explique el comportamiento último de la materia de todo el Universo.