



El núcleo atómico es el lugar en el que se concentran **los nucleones: protones y neutrones**. Ambas partículas tienen una masa similar ($m_p = 1,0073 \text{ u}$; $m_n = 1,0087 \text{ u}$) y son mucho más pesadas que los electrones corticales ($m_p = 1840 m_e$).

Partículas atómicas	Radio (m)	Masa			Carga (C)
		(Kg)	(uma)	(GeV/c ²)	
Electrón	$<10^{-18}$	$9,110 \cdot 10^{-31}$	0,00054891	0,000511	$- 1,60 \cdot 10^{-19}$
Protón	10^{-15}	$1,673 \cdot 10^{-27}$	1,0073	0,938	$+ 1,60 \cdot 10^{-19}$
Neutrón	10^{-15}	$1,675 \cdot 10^{-27}$	1,0087	0,940	0

Podemos determinar el número de partículas presentes en el núcleo de un átomo si conocemos dos de sus parámetros característicos:

- **Número atómico (Z)**, o número de orden de la casilla que el elemento ocupa en la tabla periódica. **Nos da el número de protones del núcleo**. Los átomos de elementos distintos se diferencian en que tiene distinto número de protones en el núcleo (distinto Z).
- **Número másico (A)**, que da el número total de nucleones (suma de neutrones y protones) del núcleo.

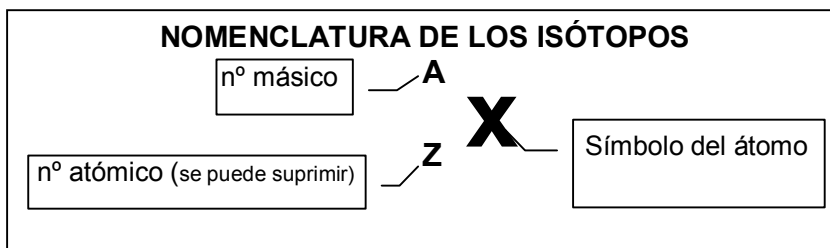
El número de neutrones de un átomo se determina, por tanto, restando el número másico del atómico:

$$n = A - Z$$

Los átomos de un mismo elemento no son exactamente iguales, aunque todos poseen el mismo número de protones en el núcleo (igual Z), pueden tener distinto número de neutrones (distinto A).

Los átomos de un mismo elemento (igual Z) que difieren en el número de neutrones (distinto A), se denominan isótopos.

Todos los isótopos tienen las mismas propiedades químicas, solamente se diferencian en que unos son un poco más pesados que otros. Muchos isótopos pueden desintegrarse espontáneamente emitiendo energía. Son los llamados **isótopos radioactivos**.



Ejemplos:

⁴He : Helio- 4

¹⁴C : Carbono- 14

²³⁵U : Uranio- 235

Se denominan **isobaros** los núcleos que tienen igual A (igual número de nucleones) y distinto Z. (distinto número de protones) Los núcleos isóbaros tienen igual número de partículas en el núcleo (nucleones) y pertenecen a elementos distintos. Ejemplos: ¹⁴C (Z = 6 ; A = 14) y ¹⁴N (Z = 7 ; A = 14).

Son **isotonos** los núcleos de distintos elementos (distinto Z) que contienen igual número de neutrones (igual A-Z). Ejemplos: ³¹P (Z = 15 ; A = 31) y ³²S (Z = 16 ; A = 32).

En física nuclear se emplea el término **núclido o nucleido** para referirse a núcleos distintos.

Si un átomo típico tiene un tamaño (radio) del orden de 0,1 nm (10^{-10} m), su núcleo alcanza escasamente los 10^{-14} m. Esto es, **el tamaño del núcleo es del orden de una diezmilésima del total del átomo**. El conjunto de partículas nucleares, protones y electrones, se deben de localizar, por tanto, en un volumen muy reducido. Si consideramos que los protones tienen carga eléctrica positiva y que estas cargas deben de ejercer una considerable fuerza repulsiva entre ellas, **se ha de postular la existencia de una fuerza capaz de mantener los protones confinados en el núcleo**. Dicha fuerza debería cumplir algunos requisitos:

- Debe ser bastante más fuerte que la fuerza electromagnética.
- Su alcance no debería ser mayor que el tamaño del núcleo, ya que su existencia no es conocida fuera del dominio nuclear.

Esa fuerza, efectivamente, existe, y recibe el nombre de **fuerza o interacción fuerte**, y está considerada como una de las cuatro interacciones básicas de la naturaleza.

- **La interacción fuerte es (aproximadamente) cien veces mayor que la interacción electrostática.**
- **Es sólo apreciable cuando las partículas están muy próximas** (a distancias del orden de 10^{-15} m) decreciendo muy rápidamente a medida que se alejan. De ahí que para distancias superiores al tamaño de un núcleo dicha fuerza sea prácticamente inapreciable, siendo entonces la interacción electrostática la dominante.
- **Es independiente de la carga eléctrica** ya que las fuerzas p-p, p-n y n-n tienen prácticamente la misma intensidad.
- **Los electrones no participan de la interacción fuerte**, mientras que los protones y neutrones sí lo hacen. La razón estriba en que los nucleones tienen una estructura interna (quarks), mientras que los electrones carecen de ella.
- **La interacción fuerte se dice que es de "corto alcance"**, para significar que sólo tiene valores apreciables a distancias muy cortas, lo cual impide que podamos apreciar sus efectos a distancias macroscópicas.

Un detalle importante es que la masa de un núcleo es siempre inferior a la suma de las partículas que lo componen. Esta diferencia recibe el nombre de **defecto de masa**:

$$M_{\text{núcleo}} < Z m_p + (A - Z) m_n$$

$$\Delta m = M_{\text{núcleo}} - [Z m_p + (A - Z) m_n]$$

Considerando la relación existente entre masa y energía podemos considerar que la masa se transforma en energía :

$$E = \Delta m c^2$$

Si consideramos los nucleones por separado y el núcleo ya formado, vemos que éste tiene una menor energía que las partículas separadas. **La formación de los núcleos conduce a una estabilización frente a los nucleones por separado**. La diferencia de energía correspondiente recibe el nombre de **energía de enlace**. También se puede razonar que la energía de enlace es la que hay que aportar a los núcleos para romperlos en su partículas constituyentes.

$$M_{\text{núcleo}} < Z m_p + (A - Z) m_n$$

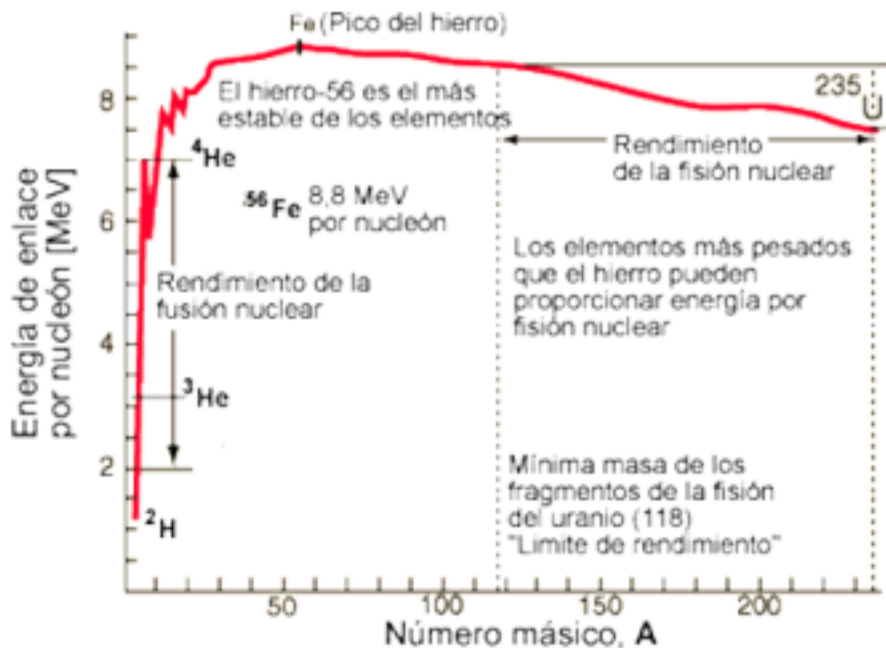
$$E_{\text{Enlace}} = \Delta m c^2 = [(Z m_p + (A - Z) m_n) - M_{\text{núcleo}}] c^2$$

Repartiendo la energía de enlace entre el número de nucleones obtenemos la **energía de enlace por nucleón**, que es una magnitud indicativa de la estabilidad del núcleo. **A mayor energía de enlace por nucleón, más estable es el núcleo**

$$\frac{E_{\text{Enlace}}}{\text{Nucleón}} = \frac{E_{\text{Enlace}}}{A}$$

La energía de enlace por nucleón aumenta a medida que vamos considerando los elementos del sistema periódico hasta el ^{56}Fe . O lo que es lo mismo, hasta el ^{56}Fe la estabilidad de los núcleos es cada vez mayor. A partir del hierro la energía de enlace por nucleón empieza a disminuir. A partir del hierro los núcleos son cada vez menos estables. Por tanto, si vamos obteniendo los núcleos de los elementos a partir de los precedentes (tal y como ocurrió al principio de universo mediante reacciones de fusión) obtenemos núcleos cada vez más estables respecto a los precedentes, lo cual es un proceso energéticamente favorable. El hierro marcaría el punto en el cual la **nucleosíntesis** (creación de núcleos de elementos más pesados a partir de núcleos más ligeros) dejaría de ser un proceso energéticamente favorable para pasar a absorber energía. A partir de ahí el proceso favorable es el inverso: la fisión nuclear.

Hoy día se considera que los elementos más pesados que el hierro se han formado gracias a la energía desprendida en las explosiones de supernovas (recordar que la formación de estos núcleos es un proceso endotérmico).



Ejemplo 1 (Oviedo 2010 - 2011)

El hierro 56 tiene un número atómico $Z = 26$ y una masa de $55,9394 \text{ u}$. Sabiendo que la masa de un protón es $1,0073 \text{ u}$ y la de un neutrón es $1,0087 \text{ u}$, determine:

- El defecto de masa en u
- La energía de enlace del núcleo en julios
- La energía de enlace por nucleón en julios

DATOS: $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$; $1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

Solución:

- Calculamos el defecto en masa viendo la diferencia entre la masa del núcleo y la de los nucleones que lo forman:

$$\Delta m = [Z m_p + (A - Z) m_n] - M_{\text{núcleo}}$$

$$\Delta m = [26 \cdot 1,0073 \text{ u} + 30 \cdot 1,0087 \text{ u}] - 55,9394 \text{ u} = 0,5114 \text{ u}$$

- La energía correspondiente al defecto de masa es la energía de enlace:

$$E_{\text{Enlace}} = \Delta m c^2 = 0,5114 \text{ u} \cdot \frac{1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{1 \text{ u}} \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = 7,64 \cdot 10^{-11} \text{ J}$$

- La energía de enlace por nucleón será:

$$\frac{E_{\text{Enlace}}}{\text{nucleón}} = \frac{E_{\text{Enlace}}}{A} = \frac{7,64 \cdot 10^{-11} \text{ J}}{56} = 1,36 \cdot 10^{-12} \frac{\text{J}}{\text{nucleón}}$$

Estabilidad del núcleo atómico. Radiactividad
--

Algunos elementos (la mayor parte de ellos con un número atómico superior a 83) se transforman espontáneamente en átomos de otros elementos con un número atómico próximo, a la vez que emiten partículas y energía. El descubrimiento de este fenómeno, realizado a principios de 1896 y conocido con el nombre de **radiactividad**, se atribuye a Henry Becquerel.



El Premio Nobel de Física de 1903 fue dividido, correspondiendo la mitad a **A. H. Becquerel** (izquierda) "en reconocimiento a los extraordinarios servicios que ha prestado con sus descubrimiento de la radiactividad espontánea". La otra mitad, a **Pierre y Marie Curie** "en reconocimiento a los extraordinarios servicios que han prestado con sus investigaciones conjuntas sobre los fenómenos de radiación descubiertos por el profesor Becquerel"

La radiactividad es un fenómeno nuclear. Es decir, los procesos que dan lugar a que los elementos se transmuten en otros emitiendo partículas y energía tiene lugar en el interior del núcleo atómico.

Existen nucleidos estables (una minoría) y otros que son inestables (la gran mayoría). Por esta razón sólo los nucleidos más estables se encuentran en la naturaleza, ya que los inestables se desintegran en un intervalo de tiempo más o menos corto en los isótopos más estables.

¿Qué es lo que determina que un nucleido sea más o menos estable?

¿Cuáles son los procesos nucleares mediante los que se produce la transmutación de los elementos?

Para responder a estas preguntas consideremos algunos

hechos:

- **Existe un elevado número de nucleidos que tienen un número de protones o neutrones (o ambos) igual a : 2, 8, 20, 50, 82, 126.**

Los números anteriores, conocidos con el nombre de **números mágicos**, parece que aportan estabilidad a los núcleos. Así los dos isótopos más abundantes, el ^{16}O ($Z = 8$) y el ^4He ($Z=2$) son doblemente mágicos.

La existencia de los números mágicos sugiere la presencia de niveles energéticos en el núcleo análogos a los que existen en la corteza del átomo.

- Si atendemos a la paridad de Z y N , observamos que **aproximadamente la mitad de los nucleidos tienen número par de protones y neutrones** y la combinación más escasa es la que se corresponde con Z y N impar

Clasificación de los nucleidos de acuerdo con la paridad			
Z	N	A	Número
Par	Par	Par	166
Par	Impar	Impar	57
Impar	Par	Impar	53
Impar	Impar	Par	8

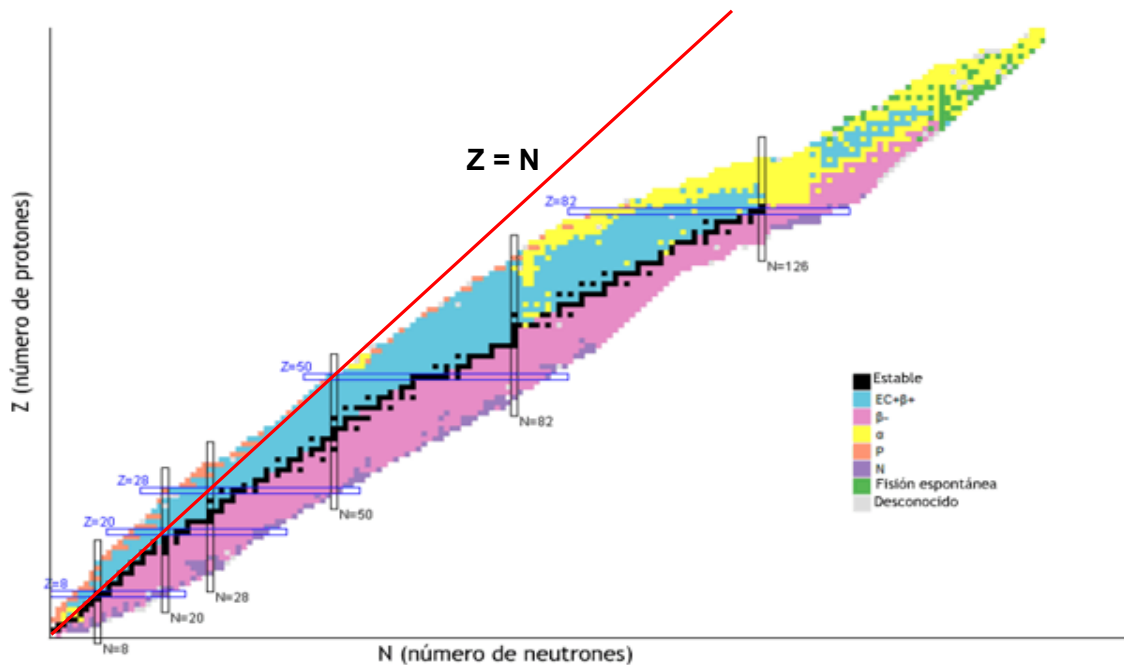
Estos datos parece que sugieren una tendencia al apareamiento entre nucleones de la misma clase.

- **En los primeros núclidos (hasta $Z = 20$) existe una igualdad entre el número de protones y neutrones. A partir de ahí el número de neutrones crece mucho más rápidamente.**

La mayor presencia de neutrones en núclidos estables con $Z > 20$ apunta a que a medida que crece el número de protones van aumentando las fuerzas de repulsión electrostática, lo que requiere un aumento de partículas neutras, sensibles a la interacción fuerte, que aporten fuerzas de unión entre ellas.

En el diagrama que se muestra (**carta de nucleidos o diagrama de Segré**) se representa el número de protones (Z), frente al número de neutrones (N). Se puede observar como hasta Z=20, aproximadamente, los núclidos estables (puntos negros) se distribuyen a lo largo de la bisectriz del cuadrante (Z=N). A partir de ahí la estabilidad implica una mayor proporción de neutrones.

Los núclidos inestables situados en la zona azul tenderán a la estabilidad mediante procesos que hagan disminuir el número de protones. Los situados en la zona rosa, por el contrario, tenderán a la estabilidad haciendo que disminuyan el número de neutrones.



Fuente: National Nuclear Data Center NNDC
<http://www.nndc.bnl.gov/>

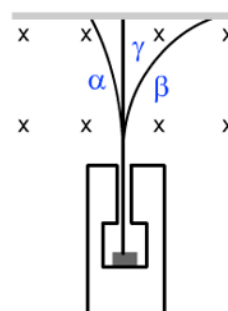
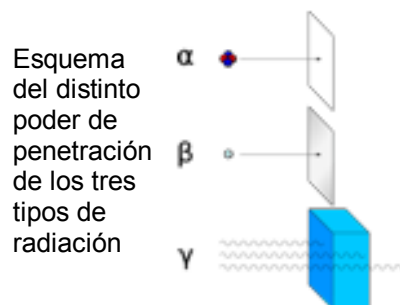
Los procesos mediante los cuales los núcleos buscan su estabilidad implican transformaciones que se manifiestan con la emisión de radiación.

- **La radiación emitida por los isótopos radiactivos tiene una energía considerable y es capaz de arrancar electrones a la materia produciendo su ionización (radiación ionizante). Se distinguen tres tipos:**

Radiación alfa (α). Se corresponde con núcleos de ${}^4\text{He}$ que son expulsados del núcleo atómico. Son, por tanto, partículas positivas de masa considerable, formadas por dos protones y dos neutrones. Tiene un bajo poder de penetración, ya que es detenida por una lámina de papel o la piel humana.

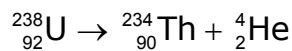
Radiación beta (β). Formada por electrones procedentes del núcleo atómico (no de la corteza). Son, por tanto, partículas muy ligeras con carga negativa. Tiene un poder de penetración mayor que la radiación alfa. Es detenida por una lámina de metal delgada.

Radiación gamma (γ). No son partículas materiales, sino radiación electromagnética de frecuencia elevada (superior a los rayos X). Tiene un elevado poder de penetración. Para detenerla son necesarias capas de hormigón de espesor considerable.



Las características (carga, masa) de las radiaciones se ponen de manifiesto sometiénolas a la acción de un campo magnético.

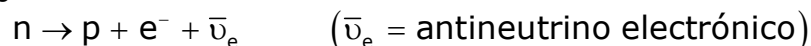
La emisión de partículas alfa es más frecuente en núclidos de elevado número atómico (ver puntos amarillos en el diagrama de Segré). Podemos imaginar que la energía disponible se concentra en dos protones y dos neutrones provocando su expulsión del núcleo. **El núclido resultante tras una emisión alfa tendrá dos protones menos (luego su número atómico será dos unidades menor) y dos neutrones (luego su número másico disminuye en cuatro unidades)**



Observar que en la reacción anterior **se conserva tanto el número atómico como el número másico**. Esto es, el número de nucleones. Esto es un hecho extensivo a todas las reacciones nucleares, en las que también **se conserva la carga eléctrica** (ver nota al final de esta sección).

La emisión alfa es característica (aunque no exclusiva) de elementos con un número atómico elevado (puntos amarillos en el diagrama de Segré)

- **La emisión de partículas beta (electrones)** se debe a la conversión de un neutrón en un protón según el proceso siguiente:



El núclido resultante tras una emisión beta tiene un protón más (su número atómico aumenta en una unidad) y un neutrón menos.

El antineutrino electrónico es la antipartícula del neutrino electrónico, una partícula sin carga y casi sin masa, predicha por Pauli en 1930. Su existencia fue confirmada en 1956.

La emisión beta es característica de aquellas sustancias que poseen un exceso de neutrones (puntos rosa en el diagrama de Segré).

Leyes del desplazamiento radiactivo

Leyes de Soddy y Fajans (1913)

1. Si un núclido emite una partícula alfa se transforma en otro con un número atómico dos unidades menor y un número másico cuatro unidades inferior. El nuevo núclido corresponderá al elemento situado dos lugares antes en la tabla periódica.
2. Si un núclido emite una partícula beta se transforma en otro con un número atómico una unidad mayor. Su número másico no varía. El nuevo núclido corresponderá al elemento situado un lugar más avanzado en la tabla periódica.

Una transformación alfa seguida de dos beta produce un isótopo del primer elemento con un número másico cuatro unidades inferior.

- **También existe la emisión denominada beta + (emisión de positrones)**. En este caso lo que sucede es que un protón se convierte en un neutrón según:

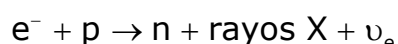


El positrón es la antipartícula del electrón.

El núclido resultante tras una emisión beta + tiene un protón menos (su número atómico disminuye en una unidad) y un neutrón más.

La emisión beta + es característica de aquellas sustancias que poseen un exceso de protones (puntos azules en el diagrama de Segré).

- **La captura electrónica** es otra posibilidad de estabilización del núcleo, aunque es un proceso menos frecuente que los anteriores. Consiste en la captura por el núcleo de un electrón de las capas más internas que se combinará con un protón del núcleo para dar un neutrón:



Aunque el resultado final es el mismo que el de la emisión beta +, en este caso no existe emisión de partículas. Los rayos X provienen de la energía desprendida por electrones más externos que caen hacia la capa en la que el electrón capturado ha dejado un hueco.

La captura electrónica (abreviada EC) es característica de aquellas sustancias que poseen un exceso de protones (puntos azules en el diagrama de Segré).

La fuerza o interacción débil es la responsable de la emisión beta y del proceso de captura electrónica acompañada de neutrinos.

La interacción débil completa el conjunto de interacciones básicas de la naturaleza.

- **La emisión de radiación gamma** (ondas electromagnéticas de mayor frecuencia que los rayos X) se debe a que los nucleones absorben energía "saltando" a niveles de energía superior (estados excitados) para "caer" a continuación hasta niveles energéticamente inferiores liberando la diferencia de energía en forma de rayos gamma, en un proceso similar al que ocurre con los electrones corticales de los átomos.

La emisión de rayos gamma no es simultánea con la de partículas alfa o beta. Generalmente los núcleos absorben parte de la energía liberada en la emisión alfa o beta, pasando a un estado excitado y tras un periodo de tiempo (generalmente corto), emiten la energía absorbida en forma de rayos gamma.

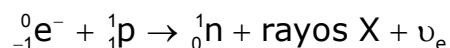
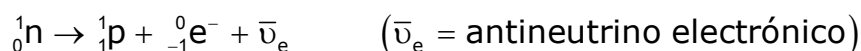
- **La fisión espontánea** es el último de los procesos radiactivos por los cuales el núcleo busca su estabilidad. Es característica de los núcleos muy pesados (uranio y transuránidos). **La fisión rompe el núcleo para dar núcleos más ligeros**, proceso que va acompañado de la emisión de neutrones, partículas beta y rayos gamma.

NOTA

El número atómico y másico asignados al protón neutrón, electrón y positrón se dan en la tabla siguiente:

Partícula	A	Z	Notación
Protón	1	1	${}^1_1\text{p}$
Neutrón	1	0	${}^1_0\text{n}$
Electrón	0	-1	${}^0_{-1}\text{e}^-$
Positrón	0	1	${}^0_1\text{e}^+$

Teniendo en cuenta esta asignación podemos reescribir las ecuaciones correspondientes a los procesos radiactivos expuestos, para comprobar que en todas ellas se conserva tanto el número atómico como el másico:



Ejemplo 2 (Oviedo 2006 - 2007)

Entre los materiales gaseosos que se pueden escapar de un reactor nuclear se encuentra el $^{131}_{53}\text{I}$ que es muy peligroso por la facilidad con que se fija en la glándula tiroides.

- Escribe la reacción de desintegración sabiendo que se trata de un emisor beta.
- Calcula, en unidades S.I., la energía total liberada por el núcleo al desintegrarse.

DATOS: $^{131}\text{I} = 130,90612 \text{ u}$; $^{131}\text{Xe} = 130,90508 \text{ u}$; partícula beta: $5,4891 \cdot 10^{-4} \text{ u}$;

$1 \text{ u} = 1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Solución 1

- La emisión beta implica la conversión de un neutrón en un protón. El núcleo resultante, por tanto, tendrá un número atómico una unidad superior (correspondiente al Xe) y su número másico será idéntico: $^{131}_{53}\text{I} \rightarrow ^{131}_{54}\text{Xe} + ^0_{-1}\text{e}^- + \bar{\nu}_e$
- Suponiendo masa prácticamente nula para el neutrino electrónico **y suponiendo que las masas suministradas para los nucleidos son masas nucleares**, tendremos:

Masa inicial (m_i) = $130,90612 \text{ u}$

Masa final (m_f) = $(130,90508 + 5,4891 \cdot 10^{-4}) \text{ u} = 130,90563 \text{ u}$

Defecto de masa: ($m_f - m_i$) = $(130,90563 - 130,90612) \text{ u} = -4,910 \cdot 10^{-4} \text{ u}$

$$4,9 \cdot 10^{-4} \cancel{\mu} \frac{1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{1 \cancel{\mu}} = 8,13645 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

Luego la energía generada (masa convertida en energía) será:

$$E = m c^2 = 8,13645 \cdot 10^{-31} \text{ kg} (3 \cdot 10^8)^2 (\text{m/s})^2 = 7,3228 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

$$7,3228 \cdot 10^{-14} \cancel{\mu} \frac{1 \cancel{\text{eV}}}{1,6 \cdot 10^{-19} \cancel{\mu}} \frac{1 \text{ MeV}}{10^6 \cancel{\text{eV}}} = 0,4577 \text{ MeV}$$

Solución 2

- La emisión beta implica la conversión de un neutrón en un protón. El núcleo resultante, por tanto, tendrá un número atómico una unidad superior (correspondiente al Xe) y su número másico será idéntico: $^{131}_{53}\text{I} \rightarrow ^{131}_{54}\text{Xe} + ^0_{-1}\text{e}^- + \bar{\nu}_e$
- Suponiendo masa prácticamente nula para el neutrino electrónico, **y si las masas facilitadas son las masas atómicas de los átomos neutros, esto es, incluyendo sus electrones, (son las masas generalmente tabuladas) hay que tener en cuenta que el Xe-131 no es una especie neutra, pues tiene 54 protones y 53 electrones (ya que el número de electrones corticales queda inalterado y el yodo tiene 53), pero como la masa del Xe-131 corresponde a la especie neutra (54 electrones), no deberemos sumar la masa del electrón generado como consecuencia de la emisión beta:**

Masa inicial (m_i) = $130,90612 \text{ u}$

Masa final (m_f) = $130,90508 \text{ u}$

Defecto de masa: ($m_f - m_i$) = $(130,90508 - 130,90612) \text{ u} = -1,04 \cdot 10^{-3} \text{ u}$

$$1,04 \cdot 10^{-3} \cancel{\mu} \frac{1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{1 \cancel{\mu}} = 1,7227 \cdot 10^{-30} \text{ kg}$$

Luego la energía generada (masa convertida en energía) será:

$$E = m c^2 = 1,7227 \cdot 10^{-30} \text{ kg} (3 \cdot 10^8)^2 (\text{m/s})^2 = 1,5504 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

$$1,5504 \cdot 10^{-13} \cancel{\mu} \frac{1 \cancel{\text{eV}}}{1,60 \cdot 10^{-19} \cancel{\mu}} \frac{1 \text{ MeV}}{10^6 \cancel{\text{eV}}} = 0,9690 \text{ MeV} = 969,0 \text{ keV}$$

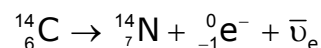
Este es el método de resolución empleado en Nuclear Phisyc (<http://bit.ly/1XPIHPz>)

En la web de la National Nuclear Data Center (NNDC) (<http://1.usa.gov/1WjNgl>) se pueden ver los datos para esta reacción, que son los que se muestran a continuación, y que están muy próximos a los obtenidos siguiendo el segundo método de resolución.

Authors: Yu. Khazov, I. Mitropolsky, A. Rodionov Citation: Nuclear Data Sheets 107, 2715 (2006)

Parent Nucleus	Parent E(level)	Parent Jπ	Parent T _{1/2}	Decay Mode	GS-GS Q-value (keV)	Daughter Nucleus	Decay Scheme	ENSDF file
¹³¹ ₅₃ I	0.0	7/2+	8.0252 d 6	β ⁻ : 100 %	970.8 6	¹³¹ ₅₄ Xe		

Para la emisión beta del C-14:



DATOS: ¹⁴C= 14,00324202 u; ¹⁴Ne= 14,00307440 u; partícula beta: 5,4891 10⁻⁴ u;

1 uma= 1,6605 10⁻²⁷ kg; c = 3 10⁸ m/s

Si se resuelve según el primer procedimiento se obtiene un incremento de masa positivo (lo que haría inviable el proceso):

Masa inicial (m_i) = 14,00324202 u

Masa final (m_f) = (14,00307440 + 5,4891 10⁻⁴) u = 14,0085635 u

Defecto de masa: (m_f - m_i) = (14,0085635 - 14,00324202) u = 5,32148 10⁻³ u

Resolviendo según la solución 2 se obtiene un resultado correcto:

Masa inicial (m_i) = 14,00324202 u

Masa final (m_f) = 14,00307440 u

Defecto de masa: (m_f - m_i) = (14,00307440 - 14,00324202) u = - 1,676210⁻⁴ u

$$1,6762 \cdot 10^{-4} \cancel{\mu} \frac{1,6605 \cdot 10^{-27} \text{kg}}{1 \cancel{\mu}} = 2,783330 \cdot 10^{-31} \text{kg}$$

Luego la energía generada (masa convertida en energía) será:

$$E = m c^2 = 2,783330 \cdot 10^{-31} \text{kg} (3 \cdot 10^8 \text{m/s})^2 = 2,504997 \cdot 10^{-14} \text{J}$$

$$2,504997 \cdot 10^{-14} \cancel{\text{J}} \frac{1 \cancel{\text{eV}}}{1,60 \cdot 10^{-19} \cancel{\text{J}}} \frac{1 \text{MeV}}{10^6 \cancel{\text{eV}}} = 0,156562 \text{MeV} = 156,56 \text{keV}$$

Author: F. Ajzenberg-selove Citation: Nuclear Physics A523,1 (1991)

Parent Nucleus	Parent E(level)	Parent Jπ	Parent T _{1/2}	Decay Mode	GS-GS Q-value (keV)	Daughter Nucleus	Decay Scheme	ENSDF file
¹⁴ ₆ C	0	0+	5700 y 30	β ⁻ : 100 %	156.475 4	¹⁴ ₇ N		

Ley de decaimiento radiactivo

Tal y como se ha discutido en el apartado anterior existen núclidos inestables que tratan de adquirir una mayor estabilidad emitiendo radiactividad: partículas y energía. Como consecuencia de este proceso los núclidos radiactivos van desapareciendo transformándose en otros más estables, proceso que recibe el nombre de **"decaimiento radiactivo"**.

Si llamamos N_0 al número de núclidos inicialmente presentes, al cabo de un tiempo t estarán presentes una cantidad, N , dada por la expresión:

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

λ es la **constante de desintegración**. Es característica de cada núclido y representa la probabilidad de desintegración por unidad de tiempo.

Es importante notar que **es imposible predecir cuando se va a desintegrar un núcleo determinado**. No obstante, sí podemos saber cuántos van a desintegrarse (o quedar) al cabo de un cierto tiempo usando la ecuación anterior.

Se denomina periodo de desintegración ($T_{1/2}$) al tiempo que tardan en desintegrarse la mitad de los núcleos presentes:

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

$$e^{-\lambda T_{1/2}} = \frac{1}{2}; \quad \ln(e^{-\lambda T_{1/2}}) = \ln\left(\frac{1}{2}\right)$$

$$-\lambda T_{1/2} \cdot \ln e = \ln 1 - \ln 2$$

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

Se denomina vida media (τ) al tiempo medio que tarda un núclido en desintegrarse.

La vida media es un concepto puramente estadístico y viene dada por la inversa de la constante de desintegración:

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

A la velocidad de desintegración de una sustancia radiactiva se denomina actividad (A) y se puede calcular derivando la expresión de la ley del decaimiento radiactivo respecto del tiempo.

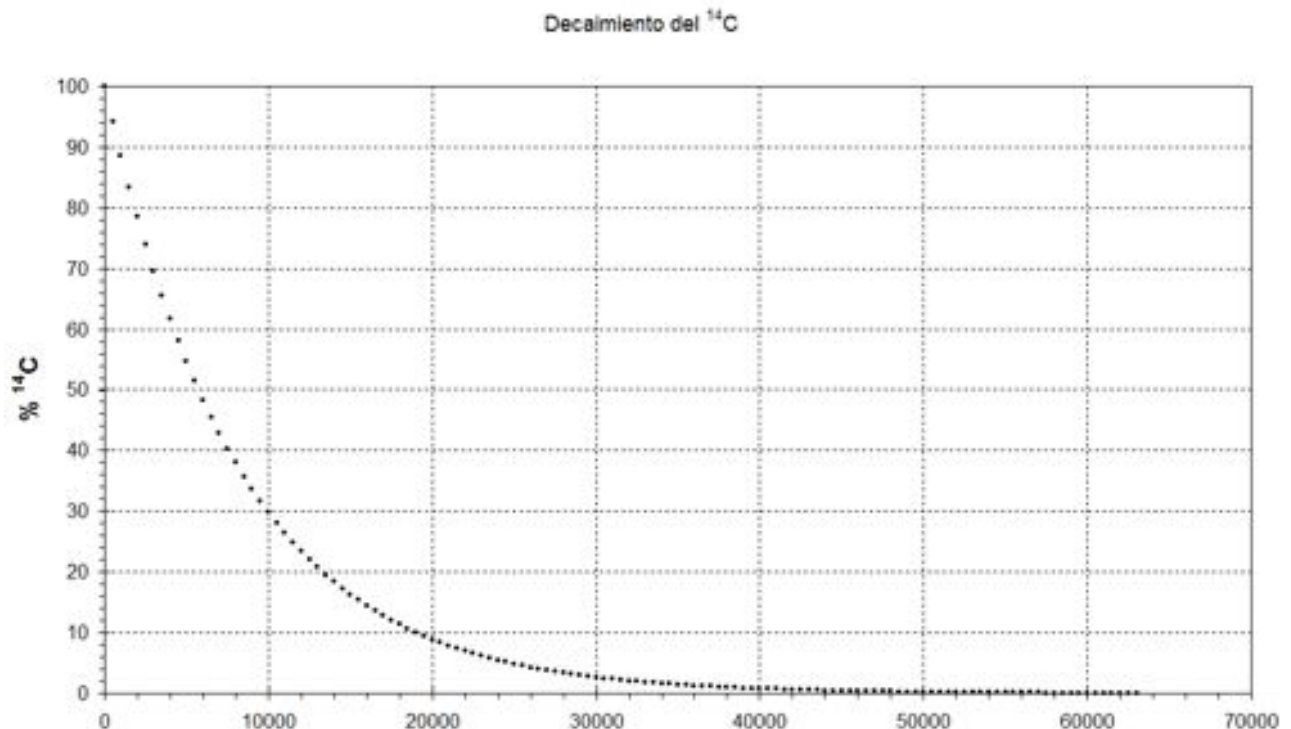
$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = N \lambda$$

Dado que la tasa de desintegración (dN/dt) es negativa ya que cada vez quedan menos núcleos, se afecta a la derivada del signo menos para obtener una velocidad de desintegración (o actividad) positiva.

Como unidad de actividad se tomó inicialmente la correspondiente a 1,00 g de Ra ($3,700 \cdot 10^{10}$ núcleos/s)

La unidad S.I. es **núcleos/s** (ó s^{-1}) que se conoce con el nombre de **becquerel (Bq) o becquerelio**.

Se define como la actividad de una cantidad de material radioactivo con una tasa de decaimiento de un núcleo por segundo.



Gráfica en la que se muestra la proporción de ^{14}C en una muestra de material orgánico en función del tiempo (en años) transcurrido.

El ^{14}C es un isótopo radiactivo cuyo periodo de semidesintegración es de 5730 años. Mientras un organismo está vivo ingiere con los alimentos el isótopo ^{12}C , no radiactivo, junto con el ^{14}C , radiactivo. Este último isótopo se desintegra, pero como al alimentarnos lo reponemos constantemente, la cantidad de ^{14}C permanece constante en el organismo. Al morirse y dejar de ingerir alimentos la cantidad de ^{14}C disminuye exponencialmente con el tiempo según la ley de decaimiento radiactivo. Al cabo de 5730 años el número de átomos presentes será la mitad de los originales (50%), al cabo de $5730 \times 2 = 11\,640$ años solamente quedarán el 25 % y así sucesivamente.

Determinando la proporción de ^{14}C en la muestra se puede determinar su antigüedad. Esta técnica permite determinar la antigüedad de muestras hasta unos 50 000 años.

Ejemplo 3 (Oviedo 2009 - 2010)

Tenemos 10^4 núcleos de una sustancia radiactiva en un frasco. El periodo de semidesintegración es de 6 años. ¿Cuántos átomos quedarán al cabo de 12 años?

Solución:

Como el periodo de semidesintegración es de 6 años, al cabo de ese tiempo quedarán la mitad de los núcleos presentes al principio, esto es: 5000 núcleos. Cuando pasen otros seis años el número de núcleos se reducirá nuevamente a la mitad, luego quedarán 2500 núcleos.

Aunque el cálculo es muy sencillo también podemos usar la ley de decaimiento radiactivo para determinar el número de núcleos que quedan por desintegrar:

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

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{\ln 2}{6 \text{ años}} = 0,1155 \text{ años}^{-1}$$

$$N = 10^4 e^{-(0,1155 \times 12)} = 2500$$

Ejemplo 4 (Oviedo 2000)

El ^{22}Na es un nucleido radiactivo con un periodo de semidesintegración (tiempo necesario para que el número de núcleos se reduzca a la mitad) de 2,60 años.

- ¿Cuánto vale su constante de desintegración?
- En el instante ($t=0$) en que una muestra tiene $4,3 \cdot 10^{16}$ núcleos de ^{22}Na ¿cuál es su actividad en becquerelios (desintegraciones por segundo)?
- ¿Cuál será su actividad para $t = 1$ año?
- ¿Cuánto valdrá su constante de desintegración para $t = 1$ año?
- ¿Cuándo será nula su actividad?

Solución:

- a) La constante de desintegración y periodo de semidesintegración son inversamente proporcionales:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{\ln 2}{2,60 \text{ años}} = 0,2666 \text{ años}^{-1}$$

- b) La actividad de una muestra es el valor absoluto de la velocidad de desintegración:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = N \lambda = 4,3 \cdot 10^{16} \cdot 0,2666 \text{ años}^{-1} = 1,146 \cdot 10^{16} \text{ años}^{-1}$$

$$A = 1,146 \cdot 10^{16} \frac{1}{\text{año}} \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 3,63 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$$

$$A = 3,63 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1} = 3,63 \cdot 10^8 \frac{\text{núcleos}}{\text{s}} = 3,63 \cdot 10^8 \text{ Bq}$$

- c) La actividad depende del número de núcleos presentes. Al cabo de un año quedarán:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = 4,3 \cdot 10^{16} e^{-0,2666 \times 1} = 3,3 \cdot 10^{16} \text{ núcleos}$$

Su actividad será, por tanto:

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = N \lambda = 3,3 \cdot 10^{16} \cdot 0,2666 \text{ años}^{-1} = 8,78 \cdot 10^{15} \text{ años}^{-1}$$

$$A = 8,78 \cdot 10^{15} \text{ años}^{-1} \frac{1}{\text{año}} \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 2,78 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$$

$$A = 2,78 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1} = 2,78 \cdot 10^8 \frac{\text{núcleos}}{\text{s}} = 2,78 \cdot 10^8 \text{ Bq}$$

- d) La constante de desintegración, tal y como su nombre indica, no varía con el tiempo. Es una constante característica del nucleido y que en este caso vale $0,2666 \text{ años}^{-1}$
- e) Como $A = N \lambda$, la actividad será nula cuando N (número de núcleos presentes) sea cero. Según la ley de decaimiento radiactivo el número de núcleos sin desintegrar decrece de forma exponencial, lo que implica que será nula para un tiempo infinito (ver gráfica de decaimiento del ^{14}C), aunque en un tiempo finito (más o menos largo) su actividad será prácticamente nula

Series radiactivas. Equilibrio radiactivo

Los radioisótopos naturales se desintegran generando otro isótopo hijo que a su vez decae, y este en otro... **hasta llegar a un isótopo estable cuya cantidad va aumentando con el tiempo.**

Se conocen tres series radiactivas las cuales agrupan los isótopos formados por una misma secuencia de transformaciones debidas a desintegraciones alfa o beta. **Las tres comienzan con un isótopo de vida media muy alta y acaban en un isótopo estable del plomo.** Las concentraciones de los términos intermedios se mantienen constantes con el tiempo, ya que la velocidad a la que decaen es igual a la velocidad con que se forman a partir del isótopo precedente estableciéndose un **equilibrio radiactivo.**

- **La serie de torio** empieza con el torio-232 y termina con el plomo-208. Todos los términos de esta serie tienen números másicos múltiplos de cuatro, por lo que se conoce como **serie 4n.**
- **La serie de uranio-238, también conocida como serie del radio,** empieza con el uranio-238 y termina con el plomo-206. Todos los términos de esta serie tienen números másicos que responden a la expresión $4n+2$, razón por la que se conoce también como **serie 4n+2**
- **La serie de uranio-235, también conocida como serie del actinio** empieza con el uranio-235 y termina con el plomo-207. Todos los términos de esta serie tienen números másicos que responden a la expresión $4n+3$, razón por la que se conoce también como **serie 4n+3**
- **La serie 4n+1 o serie del neptunio** contiene isótopos cuya vida media es bastante corta, razón por la cual ya no existen en la naturaleza y no se incluye entre las series radiactivas naturales.

Reacciones nucleares. Radiactividad artificial

Las reacciones nucleares se producen cuando dos núcleos se sitúan muy próximos (para lo cual deberán vencer la repulsión coulombiana que tiende a separarlos) produciéndose un reagrupamiento de los nucleones por acción de la fuerza nuclear fuerte.

La forma habitual de producir las reacciones nucleares es bombardeando un núcleo con partículas ligeras (protones, neutrones, partículas alfa,...). No se emplean como proyectiles núcleos pesados, ya que para vencer la repulsión electrostática sería necesario comunicarle una energía cinética muy grande.

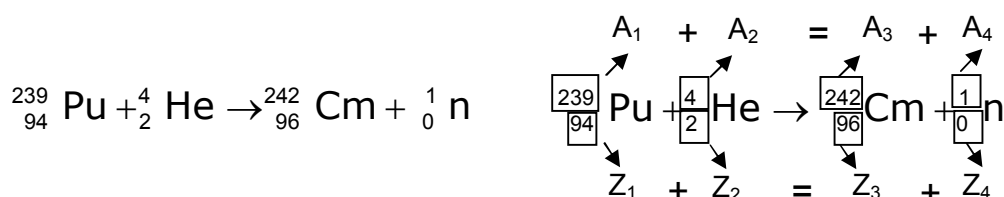
Las reacciones nucleares pueden ser consideradas como colisiones entre dos cuerpos, conservándose por tanto la energía, el momento lineal, además del número de nucleones y la carga eléctrica.

En general las reacciones nucleares se puede considerar que transcurren en dos etapas:

- Inicialmente la partícula proyectil es capturada por el núcleo que actúa como diana formándose un núcleo altamente excitado.
- En la segunda etapa el núcleo excitado recupera la estabilidad emitiendo energía (rayos gamma) y/o partículas (neutrones, partículas alfa, protones...etc).

Puede ocurrir que las partículas entrantes y salientes sean las mismas. Si sucede esto la energía se redistribuye entre las partículas que colisionan. Se habla en este caso de **dispersión.**

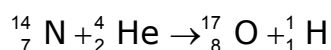
En las reacciones nucleares e produce un **reagrupamiento** de los nucleones por lo que se conserva tanto la suma de los números másicos como la de los atómicos de las núclidos participantes:



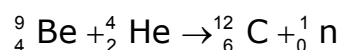
Recordamos el valor del número atómico y másico asignados al protón neutrón, electrón y positrón:

Partícula	A	Z	Notación
Protón	1	1	${}^1_1\text{p}$, ${}^1_1\text{H}$
Neutrón	1	0	${}^1_0\text{n}$
Electrón	0	-1	${}^0_{-1}\text{e}^-$
Positrón	0	1	${}^0_1\text{e}^+$

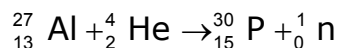
En 1918 E. Rutherford llevó a cabo la primera transmutación artificial de un elemento al bombardear nitrógeno con partículas alfa, obteniendo un isótopo del oxígeno y otra partícula más ligera que identificó con el núcleo del hidrógeno. Rutherford llegó a la conclusión de que el núcleo de hidrógeno era expulsado por el de nitrógeno, por lo que podía considerarse como una partícula fundamental a la que dio el nombre de **protón** (de *protos*=primero):



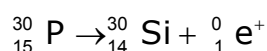
Los neutrones (cuya existencia había sido predicha por Rutherford en 1920) fueron identificados en 1932 como productos del bombardeo del berilio con partículas alfa:



Irene Curie-Joliot y su marido Frédéric Joliot (ambos recibieron el Premio Nobel de Química en 1935 por la síntesis de nuevos elementos radiactivos) anunciaron en 1934 el descubrimiento de la **radiactividad artificial** ya que al bombardear boro, magnesio o aluminio con partículas alfa se obtenía un isótopo radiactivo (${}^{30}\text{P}$) no presente en la naturaleza:



El ${}^{30}\text{P}$ formado es inestable y se desintegra espontáneamente ($T_{1/2} = 2,55$ min) emitiendo positrones según el proceso



Ejemplo 5 (Oviedo 2003-2004)

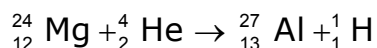
Se bombardea un blanco de ${}^{24}\text{Mg}$ con partículas alfa y se observa después de la reacción la presencia de ${}^{27}\text{Al}$ más otra partícula ligera. Sabiendo que los números atómicos del Mg y del Al son 12 y 13, respectivamente, se pide:

- Identificar razonablemente la partícula ligera.
- Si las partículas alfa tienen una energía cinética de 1 MeV, ¿podrá tener lugar esa reacción? ¿Y en caso de que su energía cinética sea de 10 MeV?

DATOS: partícula alfa: 4,0039 u ; d= 2,015 u ; n= 1,0087 u ; p= 1,0076 u ; ${}^{24}\text{Mg} = 23,9924$ u ; ${}^{27}\text{Al} = 26,9899$ u ; 1 uma= 931,5 MeV/c²

Solución:

- Teniendo en cuenta que la suma de los números másicos y atómicos se mantiene invariable, se deduce fácilmente que la partícula pedida es un protón:



Si hacemos un balance de masa para la reacción planteada, obtenemos:

- Reactivos: $m_R = (4,0039 + 23,9924) \text{ u} = 27,9963 \text{ u}$
- Productos: $m_P = (26,9899 + 1,0076) \text{ u} = 27,9975 \text{ u}$

Se puede observar que la masa de los productos es: $(27,9975 - 27,9963) \text{ u} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ u}$ superior a la de los reactivos. La reacción, por tanto violaría el principio de conservación masa - energía, ya que los productos tienen más energía:

$$1,2 \cdot 10^{-3} \cancel{\mu} \frac{931,5 \text{ MeV}}{1 \cancel{\mu}} = 1,1178 \text{ MeV}$$

La reacción, en consecuencia, no tendrá lugar si las partículas que colisionan inicialmente no tienen una energía cinética mínima igual al valor obtenido. **Por tanto, si la partícula alfa** (suponemos que el núcleo de Mg que actúa como blanco está quieto) **tiene una energía cinética de 1 MeV, no se producirá la reacción.**

Si la partícula alfa tiene una energía de 10 MeV su energía está por encima del umbral necesario (1,1178 MeV). La reacción será posible. El exceso de energía se distribuirá entre las partículas presentes (como energía cinética o aumentando la energía interna de los núcleos promoviéndolos a estados excitados)

Fusión nuclear

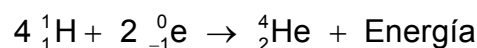
En la fusión nuclear dos núclidos se fusionan para dar un núclido más pesado.

La masa del núclido resultado de la fusión es inferior a la suma de los núclidos que se fusionan, lo que implica la liberación de la energía correspondiente ($E = mc^2$). El proceso de fusión libera, por tanto, enormes cantidades de energía.

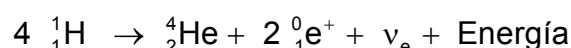
La fusión es el proceso mediante el cual las estrellas (nuestro sol, por ejemplo) obtienen su energía.

Para iniciar un proceso de fusión nuclear se requieren temperaturas muy elevadas ya que los núcleos han de poseer una considerable energía para poder acercarse venciendo la repulsión electrostática

El Sol es una estrella mediana-pequeña con una temperatura superficial de unos $6\,000^\circ\text{C}$, mientras que en su interior se estima que pueden alcanzarse temperaturas próximas a los $15\,000\,000^\circ\text{C}$. Su masa es de $2 \cdot 10^{30} \text{ kg}$, es decir, más de 300 000 veces la masa de la Tierra ($6 \cdot 10^{24} \text{ kg}$) y obtiene su energía de la fusión de átomos de hidrógeno que, a las enormes temperaturas que existen en su núcleo, son capaces de vencer las fuerzas de repulsión electrostática y se transforman en helio desprendiendo una gran cantidad de energía. Se estima que el Sol transforma en helio 4,5 millones de toneladas de hidrógeno por segundo. El proceso recibe el nombre de cadena protón-protón y se puede escribir de forma simplificada como:



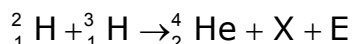
Aunque parece que el proceso protón-protón es el fundamental en estrellas de masa igual o menor a la del Sol, en las estrellas de mayor masa tiene lugar con preferencia otro proceso de fusión, el llamado ciclo CNO (carbono-nitrógeno-oxígeno), así llamado porque estos elementos actúan como catalizadores en las reacciones intermedias. La reacción global es:



A las elevadísimas temperaturas requeridas para fusionar los núcleos los electrones tienen una energía cinética tan alta que no pueden ser retenidos por los núcleos, no existiendo en consecuencia los átomos que forman la materia ordinaria. La materia se encuentra entonces en el llamado **cuarto estado de agregación de la materia**, una especie de sopa de partículas cargadas: núcleos (con carga positiva) y electrones (con carga negativa) que se comporta de forma muy parecida a un gas.

Ejemplo 6 (Oviedo 2009-2010)

En la reacción nuclear de fusión del deuterio con el tritio se genera un núcleo de helio y otra partícula, X, con un desprendimiento de energía E:

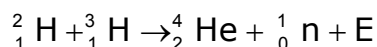


- a) ¿Qué partícula se genera (razone la respuesta)
b) Determinar el valor de E

DATOS: $c = 3,00 \cdot 10^8$ m/s; deuterio: 2,0141 u; tritio= 3,0160 u; ${}^4_2\text{He} = 4,0039$ u
 $n = 1,0087$ u; $p = 1,0073$ u; ; 1 uma= $1,6605 \cdot 10^{-27}$ kg

Solución:

- a) Como en la reacción nuclear se conservan tanto la suma de los números másicos (número de nucleones) como la de los números atómicos (protones), deducimos que la partícula pedida debe ser un neutrón:



- b) Para determinar el valor de la energía desprendida hacemos el balance de masa de la ecuación y calculamos la energía correspondiente al defecto de masa mediante la fórmula de Einstein: $E = m c^2$

Productos :

$$m_p = (4,0039 + 1,0087)u = 5,0126 u$$

Reactivos :

$$m_R = (2,0141 + 3,0160)u = 5,0301 u$$

$$\Delta m = m_p - m_R = (5,0126 - 5,0301)u = -0,0175 u$$

$$E = mc^2 = 0,0175 \cancel{u} \frac{1,6605 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{1 \cancel{u}} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = 2,62 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

NOTA: Si calculamos la cantidad de energía desprendida en la fusión de 1 mol de deuterio (2,014 g) con otro de tritio (3,016 g) obtendríamos:

$$2,62 \cdot 10^{-12} \frac{\text{J}}{\cancel{\text{núcleo}}} \frac{6,023 \cdot 10^{23} \cancel{\text{núcleos}}}{1 \text{ mol}} = 1,58 \cdot 10^{12} \text{ J}$$

Para darnos una idea de la cantidad de energía generada pensemos que de un barril de petróleo (unos 159 litros) se puede convertir en gasolina un 30 % aproximadamente, luego un barril de petróleo rinde unos 48 litros de gasolina. Un litro de gasolina genera $3,48 \cdot 10^7$ J de energía, luego la fusión de un mol de deuterio con un mol de tritio nos suministraría la energía equivalente a:

$$1,58 \cdot 10^{12} \cancel{\text{J}} \frac{1 \text{ litro gasolina}}{3,48 \cdot 10^7 \cancel{\text{J}}} = 45 \, 402 \text{ litros gasolina}$$

$$45 \, 402 \cancel{\text{litros gasolina}} \frac{1 \text{ barril petróleo}}{48 \cancel{\text{litros gasolina}}} = 946 \text{ barriles de petróleo}$$

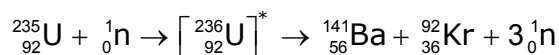
Fisión nuclear

La fisión nuclear es un proceso mediante el cual un núcleo se rompe para dar dos núcleos más ligeros (isótopos del Sr y del Xe), emitiendo, además, neutrones, partículas beta y rayos gamma.

Aunque existen núclidos muy pesados que sufre una fisión espontánea (ver diagrama de Segré), el proceso es bastante poco frecuente.

La fisión inducida se logra bombardeando núcleos de elementos pesados con neutrones. El núcleo diana captura entonces el neutrón y se forma un núclido excitado y altamente inestable que se rompe en dos fragmentos.

Una reacción típica de fisión es la experimentada por el núcleo de ^{235}U al ser bombardeado con neutrones lentos (o térmicos)



No siempre se producen los mismos fragmentos en la fisión, los fragmentos más probables para la reacción anterior son los que tienen números mágicos alrededor de 90 y 135, respectivamente, y suelen ser núclidos radiactivos, fundamentalmente emisores beta. El núclido intermedio puede estabilizarse por emisión de rayos gamma, no produciéndose entonces la fisión.

La suma de las masas de los productos es menor que la de los reactivos y este defecto de masa se convierte en energía ($E = mc^2$)



Esquema de la fisión inducida de un núcleo:

- El neutrón se dispara contra el núcleo diana.
- Una vez capturado el neutrón se forma un núclido inestable.
- El intermedio se rompe finalmente en dos fragmentos más pequeños emitiendo dos o tres neutrones y gran cantidad de energía.

Lo interesante de la fisión del ^{235}U es que en la reacción se producen una media de 2,5 neutrones, los cuales pueden provocar nuevas fisiones, dando lugar a una reacción en cadena que puede controlarse introduciendo barras de algún material que sea capaz de absorber neutrones (cadmio por ejemplo), de tal forma que la reacción se automantenga, pero sin llegar a ser explosiva.

Si la reacción no se controla se produce una reacción en cadena que libera una cantidad enorme de energía. Este es el principio en el que se basan las bombas atómicas.

Reacción en cadena

Pueden observarse (de izquierda a derecha) tres fisiones sucesivas. Los pequeños puntos azules son algunos de los neutrones generados en las fisiones.

