

FÍSICA NUCLEAR

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
		(kg)	(uma)	(C)
Electrón	$<10^{-18}$	$9,110 \cdot 10^{-31}$	0,00054891	$- 1,60 \cdot 10^{-19}$
Protón	10^{-15}	$1,673 \cdot 10^{-27}$	1,0073	$+ 1,60 \cdot 10^{-19}$
Neutrón	10^{-15}	$1,675 \cdot 10^{-27}$	1,0087	0

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

- **Número atómico (Z)**, nos da el número de protones del núcleo (número de orden de la casilla que el elemento ocupa en la tabla periódica, los átomos de elementos distintos se diferencian en que tiene distinto número de protones en el núcleo, es decir, distinto Z).

$$Z = p$$

- **Número másico (A)**, que da el número total de nucleones (neutrones+protones) del núcleo.

$$A = p + n$$

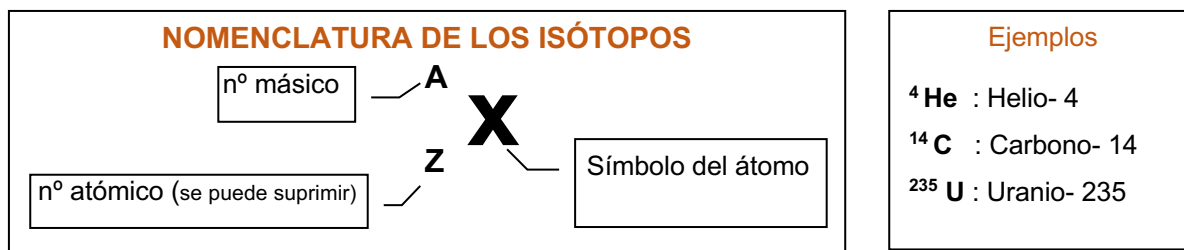
El número de neutrones de un átomo se determina, por tanto, restando el número másico del atómico:

$$n = A - Z$$

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**.



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

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, 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 nuclear fuerte**, y está considerada como una de las **cuatro interacciones básicas de la naturaleza**.

- *La interacción fuerte es unas **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**:

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

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

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 sus partículas constituyentes.

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.**

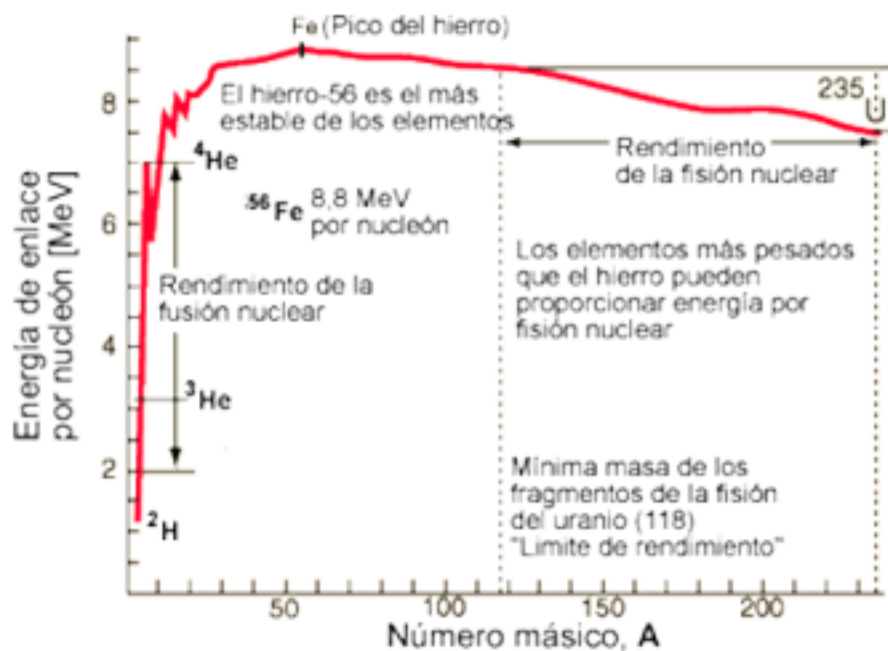
$$\frac{E_{\text{Enlace}}}{\text{Nucleón}} = \frac{E_{\text{Enlace}}}{A}$$

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).



Fuente: Wikipedia

Ejemplo 1

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 descubrimientos 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

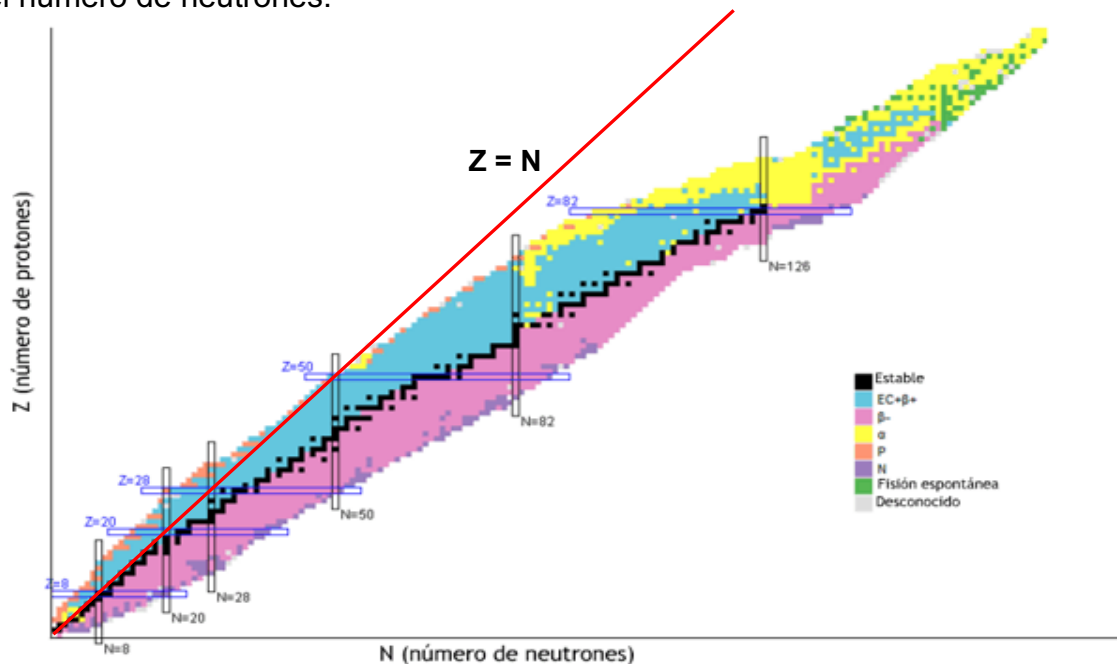
Estos datos parece que sugieren una tendencia al apareamiento entre nucleones de la misma clase.

- 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.

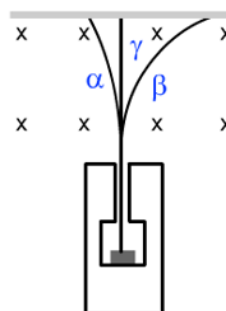
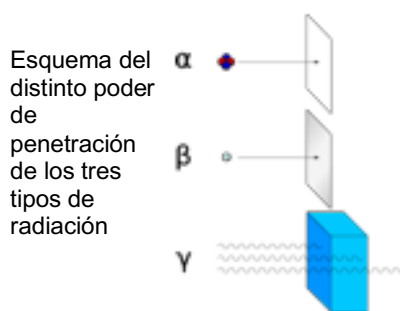
La radiación emitida por los isótopos radiactivos tiene una energía considerable y es capaz de arrancar electrones a la materia produciendo su ionización (radiación ionizante). Se distinguen tres tipos:

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.

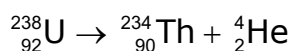
Radiación beta (β). Formada por electrones procedentes **del núcleo** atómico (no de la corteza). Son, por tanto, partículas muy ligeras con carga negativa. Tiene un poder de penetración mayor que la radiación alfa. Es detenida por una lámina de metal delgada.

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.



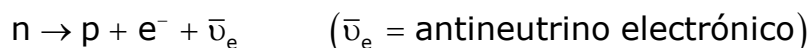
Las características (carga, masa) de las radiaciones se ponen de manifiesto sometiéndolas a la acción de un campo magnético.

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 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.

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:

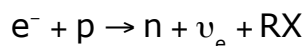


El positrón es la antipartícula del electrón.

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

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,

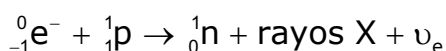
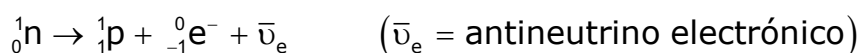
pasando a un estado excitado y tras un periodo de tiempo (generalmente corto), emiten la energía absorbida en forma de rayos gamma.

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.

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

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.

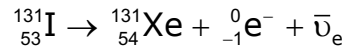
- Escribe la reacción de desintegración sabiendo que se trata de un emisor beta.
- Calcula, en unidades S.I., la energía total liberada por el núclido al desintegrarse.

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:

- a) La emisión beta implica la conversión de un neutrón en un protón. El núclido resultante, por tanto, tendrá un número atómico una unidad superior (correspondiente al Xe) y su número másico será idéntico:



- b) Calculamos la energía liberada por **Defecto de Masa**.

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 u

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

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

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

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

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 expresión anterior.

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

$$\begin{aligned} N &= N_0 e^{-\lambda t} ; \quad \frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} ; \quad \frac{N_0 / 2}{N_0} = e^{-\lambda T_{1/2}} \\ e^{-\lambda T_{1/2}} &= \frac{1}{2} ; \quad \ln(e^{-\lambda T_{1/2}}) = \ln\left(\frac{1}{2}\right) \\ -\lambda T_{1/2} \cdot \ln e &= \ln 1 - \ln 2 \\ T_{1/2} &= \frac{\ln 2}{\lambda} \end{aligned}$$

Se denomina Vida Media (τ) al tiempo medio que tarda un núclido en desintegrarse (o el tiempo que dura un núclido por término medio).

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 (número de núclidos que se desintegran por unidad de tiempo) de una sustancia radiactiva se denomina Actividad (A) y se puede calcular derivando la expresión de la ley del decaimiento radiactivo respecto del tiempo.

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

Cuanto mayor es λ , más rápido se desintegrará una muestra de núclidos.

La unidad de la actividad en el 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).

La expresión dada para el decaimiento radiactivo:

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

puede también expresarse en función de la masa del núclido considerado:

Si tenemos m_0 gramos iniciales del núclido ¿qué masa quedará sin desintegrar al cabo de un tiempo t ?

Obtengamos el número de núclidos al inicio (N_0) y al cabo de un tiempo t (N) y sustituyamos en la expresión anterior. Para ello necesitaremos saber la masa atómica del núclido. Supongamos que sea M (umas):

$$N_0 = m_0 \cancel{(\text{g})} \frac{1 \cancel{\text{mol núclidos}}}{M \cancel{(\text{g})}} \frac{6,0210^{23} \text{ núclidos}}{1 \cancel{\text{mol núclidos}}} = m_0 \left(\frac{6,0210^{23}}{M} \right) \text{ núclidos}$$

Procediendo exactamente igual calcularíamos N :

$$N = m \cancel{(\text{g})} \frac{1 \cancel{\text{mol núclidos}}}{M \cancel{(\text{g})}} \frac{6,0210^{23} \text{ núclidos}}{1 \cancel{\text{mol núclidos}}} = m \left(\frac{6,0210^{23}}{M} \right) \text{ núclidos}$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la expresión inicial, tendremos:

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

$$m \left(\frac{6,02 \cdot 10^{23}}{M} \right) = m_0 \left(\frac{6,02 \cdot 10^{23}}{M} \right) e^{-\lambda t}$$

$$m = m_0 e^{-\lambda t}$$

Por lo tanto la **actividad también se puede obtener** como:

$$A = -\frac{dm}{dt} = \lambda m_0 e^{-\lambda t} = m \lambda$$

Hay que tener en cuenta que si se calcula la actividad así no se obtiene en Bq, sino en unidades de masa/tiempo. Por ejemplo, si la masa está en gramos y la constante radiactiva se mide en días⁻¹, obtendremos la actividad medida en gramos/día (gramos desaparecidos por día).

La actividad de una sustancia al cabo de un tiempo t también se puede relacionar con la actividad que tenía inicialmente ($t=0$):

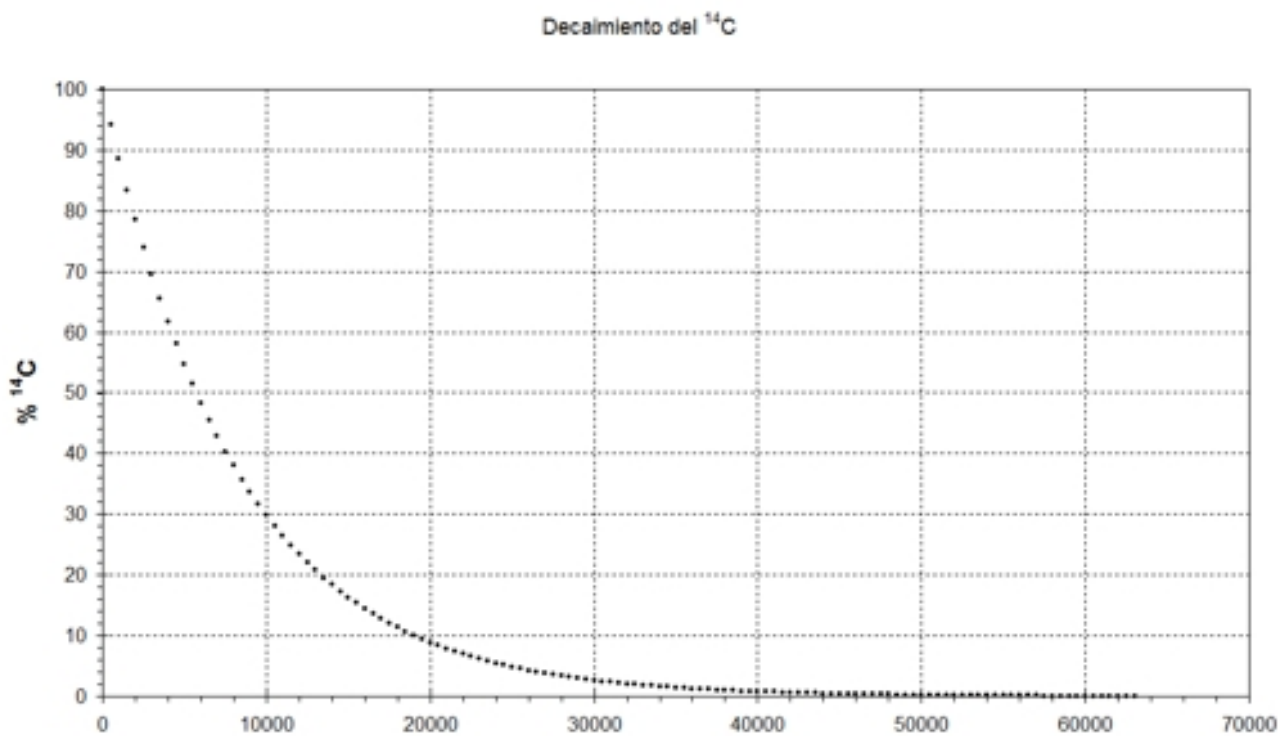
$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = N \lambda$$

$$\text{Para } t = 0; A_0 = \lambda N_0$$

Luego :

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

Esta expresión se puede usar para calcular la edad de una muestra midiendo su actividad. Es la técnica empleada en la datación de la antigüedad de una muestra con ^{14}C .



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 morir y dejar de ingerir alimentos la cantidad de ^{14}C disminuye exponencialmente con el tiempo según la ley de decaimiento radiactivo (ver gráfica). 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 actividad del ^{14}C presente en la muestra se puede determinar su antigüedad.

Ejemplo 3

Sabiendo que el periodo de semidesintegración del ^{14}C es de 5570 años averiguar la antigüedad de una momia egipcia, en años, que presenta tres cuartas partes de la actividad correspondiente a un ser vivo.

Solución:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T} = \frac{\ln 2}{5570 \text{ años}} = 1,24 \cdot 10^{-4} \text{ años}^{-1}$$

$$A = A_0 e^{-\lambda t}$$

$$\frac{3}{4} \cancel{A_0} = \cancel{A_0} e^{-\lambda t}; \quad \frac{3}{4} = e^{-\lambda t}; \quad \ln \frac{3}{4} = -\lambda t$$

$$t = -\frac{\ln \frac{3}{4}}{\lambda} = -\frac{(-0,2877)}{1,24 \cdot 10^{-4} \text{ años}^{-1}} = 2320 \text{ años}$$

Ejemplo 4

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)?
- Cual será su actividad para $t = 1$ año?
- ¿Cuánto valdrá su constante de desintegración para $t = 1$ año?
- ¿Cuándo será nula su actividad?

Solución:

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

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

$$\text{b) } A = \lambda N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\text{Para } t = 0, A_0 = \lambda N_0 = 4,3 \cdot 10^{16} \cdot 0,2666 \text{ años}^{-1} = 1,146 \cdot 10^{16} \text{ años}^{-1}$$

$$A_0 = 1,146 \cdot 10^{16} \frac{1}{\text{año}} \frac{1 \text{ año}}{365 \text{ días}} \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 3,63 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1}$$

$$A_0 = 3,63 \cdot 10^8 \text{ s}^{-1} = 3,63 \cdot 10^8 \frac{\text{núcleos}}{\text{s}} = 3,63 \cdot 10^8 \text{ Bq}$$

c) Al cabo de un año ($t = 1$ año), su actividad vendrá dada por:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = 3,63 \cdot 10^8 \text{ (Bq)} e^{-0,266 \text{ años}^{-1} \cdot 1 \text{ año}} = 2,78 \cdot 10^8 \text{ Bq}$$

También podremos hacer:

Calculemos el número de núclidos que quedan al cabo de un año:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = 4,3 \cdot 10^{16} e^{-0,266 \times 1} = 3,3 \cdot 10^{16} \text{ núclidos}$$

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

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

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

d) La constante de desintegración, tal y como su nombre indica, no varía con el tiempo. Es una constante característica del núclido 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.

Radiactividad artificial (pág 314 libro de texto)

Fusión Nuclear

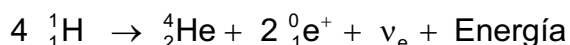
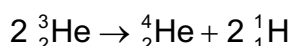
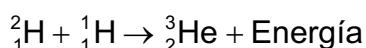
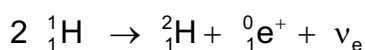
En la fusión nuclear **dos núclidos se fusionan para dar un núclido más pesado**.

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 6000 °C, mientras que en su interior se estima que pueden alcanzarse temperaturas próximas a los 15000000 °C. Su masa es de $2 \cdot 10^{30}$ kg, es decir, más de 300000 veces la masa de la Tierra ($6 \cdot 10^{24}$ 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 como:

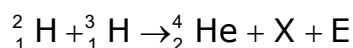


Aunque parece que el proceso protón-protón es el fundamental en estrellas de masa igual o menor a la del Sol, en las estrellas de mayor masa tiene lugar con preferencia otro proceso de fusión, el llamado **ciclo CNO** (carbono-nitrógeno-oxígeno), así llamado porque estos elementos actúan como catalizadores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

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, o plasma**, 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 5

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:

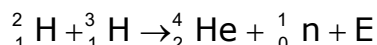


- Razona qué partícula se genera.
- Determina el valor de E.

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

Solución:

- 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:



- 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 :

$$m_p = (4,0039 + 1,0087) \text{ u} = 5,0126 \text{ u}$$

Reactivos :

$$m_R = (2,0141 + 3,0160) \text{ u} = 5,0301 \text{ u}$$

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

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

El signo-
indica que
es energía
liberada.

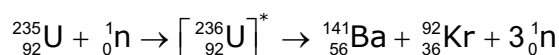
Fisión Nuclear

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

Aunque existen núclidos muy pesados que sufren una fisión espontánea el proceso es poco frecuente.

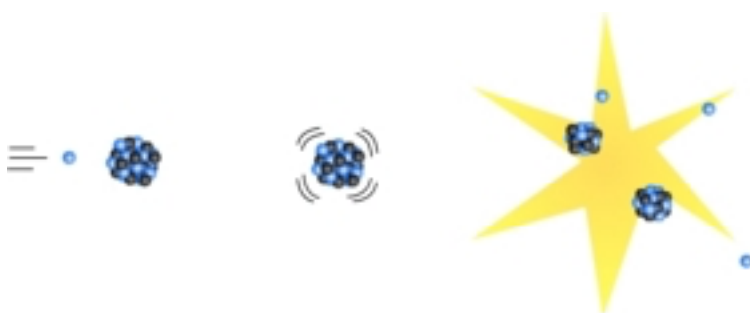
La fisión inducida se logra bombardeando núcleos de elementos pesados con neutrones. El núcleo diana captura entonces el neutrón y se forma un núclido excitado y altamente inestable que se rompe en dos fragmentos.

Una reacción típica de fisión es la experimentada por el núcleo de $^{235}_{92}\text{U}$ 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 másicos 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.

Constituyentes fundamentales: leptones quarks

Las máquinas aceleradoras de partículas permitieron sondear en la estructura interna de la materia. Como norma general, un conjunto de partículas son aceleradas hasta alcanzar una energía cinética tan alta que pueda superar la energía potencial eléctrica de repulsión entre proyectil y blanco, produciéndose el impacto con ellas. Como resultado se producen fragmentos que son analizados posteriormente teniendo en cuenta las leyes de conservación (del momento lineal y de la energía). Esto permite deducir la existencia de nuevas partículas, la masa de partículas conocidas y leyes que rigen las interacciones entre partículas.

El sondeo microscópico de la materia permitió descubrir dos nuevos tipos de fuerzas que intervienen en la naturaleza pero sólo son detectables a distancias muy cortas: **Interacción nuclear fuerte** (aproximadamente 100 veces más fuerte que la electromagnética) y la **Interacción nuclear débil** (10^{-11} veces menor que la electromagnética).

Fruto de este estudio metódico fue la identificación y estudio de nuevas partículas de masa variada, muchas de ellas pueden considerarse elementales (no pueden dividirse en otras menores) y también muchas partículas complejas, formadas por varias elementales.

Atendiendo a qué tipo de fuerzas responden las partículas, las elementales las podemos dividir en dos grandes grupos:

Leptones: la interacción fuerte no actúa sobre ellas, aunque sí la débil y la electromagnética. Tienen vidas medias largas. Existen 6 leptones con sus correspondientes antileptones. El leptón más importante es el electrón.

Quarks: responden a la interacción fuerte; el tiempo de vida de estas partículas es muy corto estableciéndose rápidamente asociaciones entre dos o tres quarks, por lo que no es posible tener un quark aislado. Existen seis tipos de quarks con sus correspondientes antiquarks. Los quarks más importantes son el quark Up (u) que tiene carga eléctrica $+2/3$ y el quark Down (d) que tiene carga eléctrica $-1/3$. Las combinaciones de estos dos quarks forman la inmensa mayoría de la materia conocida, así, el neutrón está formado por un quark u y dos quarks d, (udd), y el protón por dos quarks u y un quark d, (uud).

Antimateria

Mientras que la materia común está compuesta de partículas, la antimateria está compuesta de antipartículas. Cada partícula posee su correspondiente antipartícula.

A cada una de las partículas elementales de la naturaleza le corresponde una antipartícula que posee la misma masa, el mismo espín, pero carga eléctrica contraria. Las partículas subatómicas de la antimateria tienen cargas contrarias a las partículas de la materia.

Un antielectrón (un electrón con carga positiva, también llamado positrón) y un antiprotón (un protón con carga negativa) podrían formar un átomo de antimateria, el anti-hidrógeno, de la misma forma que un electrón y un protón forman un átomo de hidrógeno.

Si se produce contacto entre materia y antimateria se producirá su **aniquilación** mutua que no significa su destrucción física, es una **transformación de la materia en energía** que da lugar a la formación de fotones de alta energía (rayos gamma) u otros pares partícula- antipartícula.

Para diferenciar las partículas de las antipartículas en Física se usa una barra horizontal (o macrón).

protón : p antiprotón : $\bar{p}$

Para los átomos de antimateria se emplea la misma notación:

hidrógeno : H antihidrógeno : $\bar{H}$

Las hipótesis científicas estándar sostienen que en el origen del universo existían materia y antimateria en las mismas cantidades, sin embargo el universo que observamos aparentemente está compuesto únicamente por partículas y no por antipartículas. No se conocen las razones por las que no se tienen localizado grandes estructuras de antimateria en el universo.