TEMA 9. FÍSICA NUCLEAR

1. **El núcleo atómico: nº atómico, nº másico e isótopos**
2. **Defecto de masa nuclear, energía de enlace nuclear, interacción nuclear fuerte, energía de enlace nuclear por nucleón y estabilidad nuclear.**
3. **Radiactividad: descripción de los procesos alfa, beta y gamma**
4. **Ley de desintegración radiactiva: periodo de semidesintegración radiactiva, vida media y actividad**
5. **Reacciones nucleares**
6. **Fisión y fusión nucleares**
7. **Principales interacciones en la naturaleza**

Selectivitat.io

1. EL NÚCLEO ATÓMICO: Nº ATÓMICO, Nº MÁSICO E ISÓTOPOS

El descubrimiento del núcleo atómico se produjo en 1911 a partir de las experiencias realizadas por Ernest Rutherford y sus colaboradores. A partir de este hecho, Rutherford propuso un modelo atómico, conocido como *modelo nuclear. Según este modelo el átomo consta de dos partes: una parte central, denominada núcleo, y la zona periférica denominada corteza.*

El tamaño del núcleo es muy pequeño comparado con el tamaño del átomo. El radio del núcleo es del orden de 10^{-15} m = 1 fermi (fm), mientras que el radio del núcleo es del orden de 10^{-10} m = 1 Angstrom (A). Si comparamos el radio del átomo con el radio del núcleo, obtenemos que el radio del átomo es aproximadamente 10^5 (cien mil veces) superior al radio del núcleo.

En la corteza se encuentran los electrones girando alrededor del núcleo en distintas órbitas o niveles de energía. El núcleo está formado por protones y neutrones, partículas que denominamos **nucleones**.

La carga de los electrones y de los protones coincide en valor absoluto ($1{,}6.10^{-19}$ C). Por esta razón, si el átomo está en estado neutro, el nº de electrones de la corteza coincide con el nº de protones de su núcleo. Pero, si el átomo no está en estado neutro, es porque en su corteza hay un exceso o un defecto de electrones con respecto al nº de protones de su núcleo, y el átomo sería un ión cargado negativamente (anión) o cargado positivamente (catión)

La masa de los protones y neutrones es muy parecida, aunque la de los neutrones es ligeramente superior. La masa de los electrones es mucho más pequeña. En la siguiente tabla aparecen la masa y carga de las partículas subatómicas:

PARTÍCULA	CARGA	MASA
Electrón (e^-)	$-1{,}6.10^{-19}$ C	$9{,}11.10^{-31}$ Kg = 0,00055 u
Protón (p^+)	$1{,}6.10^{-19}$ C	$1{,}6726.10^{-27}$ Kg = 1,0073 u
Neutrón (n)	-	$1{,}6749.10^{-27}$ Kg = 1,0087 u

Si comparamos la masa del protón con la masa del electrón, obtenemos que el protón tiene aproximadamente 1836 veces más masa que el electrón. Por esta razón, en el núcleo se concentra la mayor parte de la masa (más del 99 %) y toda la carga positiva del átomo. En cambio, el volumen del núcleo es una parte muy pequeña del volumen atómico. Por consiguiente, el núcleo posee una elevadísima densidad (del orden de 10^{18} kg/m^3).

Para medir la masa de los átomos se utiliza la unidad de masa atómica (u), llamada también uma, que es la doceava parte de la masa de un átomo de carbono-12. La equivalencia en Kg es:

$$1 \text{ u} = 1{,}6605.10^{-27} \text{ Kg}$$

Todos los átomos de un mismo elemento químico tienen en su núcleo el mismo número de protones. A este nº se le denomina **número atómico**, y se representa por la letra **Z**. El número atómico identifica a cada elemento químico y en la tabla periódica los elementos están ordenados en orden creciente de número atómico: Z(H) = 1; Z(He) = 2; Z(Li) = 3; Z(Be) = 4; …

El nº de neutrones del núcleo puede variar de unos átomos a otros para un mismo elemento químico. Por tanto, todos los átomos de un mismo elemento químico no son iguales porque, aunque tengan el mismo nº de protones (Z), pueden tener distinto nº de neutrones.

Selectivitat.io

A los diferentes tipos de átomos de un elemento químico se les denomina **isótopos del elemento**. Por tanto, los isótopos de un elemento químico se caracterizan por tener distinta masa, ya que, en su núcleo tienen distinto nº de partículas **(o nucleones)**. En efecto los isótopos de un elemento químico, aunque tienen la misma cantidad de protones en el núcleo (igual nº atómico Z), tienen diferente nº de neutrones.

Al número de partículas (o nucleones) que tienen en el núcleo los átomos de un determinado isótopo de un elemento químico se le denomina **número másico**, y se representa por la letra **A**. Por tanto, el nº másico A de un isótopo es la suma de los protones y neutrones que tienen los átomos de dicho isótopo en su núcleo:

nº másico = nº de protones + nº de neutrones

$$A = Z + N$$

Los isótopos de un elemento químico se representan por el símbolo del elemento precedido de un subíndice y un superíndice. El subíndice representa al nº atómico y el superíndice al nº másico:

$$\begin{matrix}\text{nº másico (A)}\\ \text{nº atómico (Z)}\end{matrix}\ \text{Símbolo del elemento} \qquad {}^{A}_{Z}\text{X}$$

También se puede representar mediante el símbolo del elemento seguido de un guión y el nº másico:

Símbolo del elemento-A

Por ejemplo, el hidrógeno tiene tres isótopos, es decir, hay tres tipos de átomos de hidrógeno y son:

${}^{1}_{1}\text{H}$	${}^{2}_{1}\text{H}$	${}^{3}_{1}\text{H}$
protio	*deuterio*	*trítio*

La composición de un átomo de cada uno de estos isótopos es:

Protio: ${}^{1}_{1}\text{H}$ { núcleo { $1\ \text{p}^{+}$, $0\ \text{n}$; corteza { $1\ \text{e}^{-}$

Deuterio: ${}^{2}_{1}\text{H}$ { núcleo { $1\ \text{p}^{+}$, $1\ \text{n}$; corteza { $1\ \text{e}^{-}$

Tritio: ${}^{3}_{1}\text{H}$ { núcleo { $1\ \text{p}^{+}$, $2\ \text{n}$; corteza { $1\ \text{e}^{-}$

Hay que recordar que la masa atómica de un elemento químico no es la masa de un átomo de ese elemento químico, sino que es la masa media ponderada de las masas de sus distintos isótopos. Ponderada significa que en la media hay que tener en cuenta la abundancia relativa de sus distintos isótopos.

Llamamos **núclido** a un conjunto de átomos todos iguales entre sí, es decir, a un conjunto de átomos del mismo isótopo.

OBSERVACIÓN:
No confundir núclido con núcleo o con nucleón.

Un núclido se representa por ${}^{A}_{Z}\text{X}$, donde X es el símbolo del elemento químico al que pertenece. Cada núclido pertenece a un *isótopo* del correspondiente elemento. Los isótopos de un mismo elemento difieren sólo en el valor de A.

Selectivitat.io

2. DEFECTO DE MASA NUCLEAR, ENERGÍA DE ENLACE NUCLEAR, INTERACCIÓN NUCLEAR FUERTE, ENERGÍA DE ENLACE NUCLEAR POR NUCLEÓN Y ESTABILIDAD NUCLEAR.

2.1 Defecto de masa nuclear

Es un hecho comprobado experimentalmente que cuando se mide con precisión la masa del núcleo de un átomo cualquiera, esta resulta ser siempre inferior a la suma de las masas de las partículas que lo constituyen (nucleones). Es decir, cuando los protones y neutrones se unen para formar el núcleo se produce una pérdida de masa.

A esta disminución de masa se le denomina defecto de masa nuclear, y se calcula:

Defecto de masa nuclear = masa de los nucleones – masa del núcleo > 0

Defecto de masa nuclear = (masa de los protones + masa de los neutrones) – masa del núcleo > 0

$$\boxed{\Delta m = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - M_N > 0} \quad [9.1]$$

2.2 ENERGÍA DE ENLACE NUCLEAR

Esta masa que se pierde al formarse el núcleo es la masa que se convierte en energía y que se libera al formarse el núcleo. Esta energía la podemos calcular mediante la ecuación de Einstein de la equivalencia entre la masa y la energía, y que es:

$$E = m.c^2$$

Según la ecuación anterior, la energía que se libera al formarse un núcleo es:

$$\boxed{E = \Delta m.c^2} \quad [9.2]$$

Esta energía representa también a la mínima energía que habría que suministrar al núcleo para descomponerlo en sus nucleones y por tanto, a esta energía se le denomina **energía de enlace nuclear o energía de enlace del núcleo**.

2.3 FUERZA NUCLEAR FUERTE

¿Cómo puede explicarse la estabilidad del núcleo? La estabilidad del núcleo no puede explicarse, ni mediante fuerzas gravitatorias, ni mediante fuerzas eléctricas. En efecto, la fuerte repulsión eléctrica entre los protones frente a la débil atracción gravitatoria produciría una desintegración del núcleo.

El hecho de que en el núcleo convivan protones y neutrones sugiere que debe de existir entre ellos otro tipo de interacción, que es de atracción y mucho más intensa que la de repulsión eléctrica entre los protones. A esta fuerza se le denomina **fuerza nuclear fuerte o interacción nuclear fuerte**.

La fuerza nuclear fuerte presenta las siguientes características:

- Es la responsable de la cohesión del núcleo.
- Es una fuerza atractiva que se manifiesta entre los nucleones con independencia de su carga eléctrica.
- Es una fuerza muy intensa ya que debe de vencer a la fuerte repulsión electrostática entre los protones.
- Es de muy corto alcance ya que sólo se manifiesta a distancias inferiores al tamaño del núcleo (10^{-15} m).
- Aunque es una fuerza de atracción, cuando la separación entre los nucleones es mucho menor a su alcance, se convierte en una fuerza de repulsión para impedir el colapso entre los nucleones.
- Es una fuerza conservativa, y por tanto tiene asociada una energía potencial que es la energía de enlace nuclear.

2.4 ENERGÍA DE ENLACE NUCLEAR POR NUCLEÓN Y ESTABILIDAD NUCLEAR

Un núcleo es tanto más estable cuanto más dificultad presente a perder nucleones. Por tanto, una forma cuantitativa de medir la estabilidad de un núcleo es conocer la energía necesaria para extraer un nucleón del mismo, la cual se conoce como **energía de enlace nuclear por nucleón**.

La energía de enlace nuclear por nucleón se define como es el cociente entre la energía de enlace nuclear y el número másico:

$$\text{Energía de enlace nuclear por nucleón} = \frac{\text{Energía de enlace nuclear}}{\text{nº másico}}$$

$$\boxed{\text{Energía de enlace nuclear por nucleón} = \frac{\Delta m.c^2}{A}} \quad [9.3]$$

La energía de enlace nuclear por nucleón representa la energía media liberada por cada nucleón incorporado al núcleo, o lo que lo mismo, la energía media mínima que habría que suministrar al núcleo para extraerle un nucleón.

Experimentalmente se ha comprobado que la energía de enlace por nucleón varía con el número másico según la curva de la figura 9.1.

Selectivitat.io

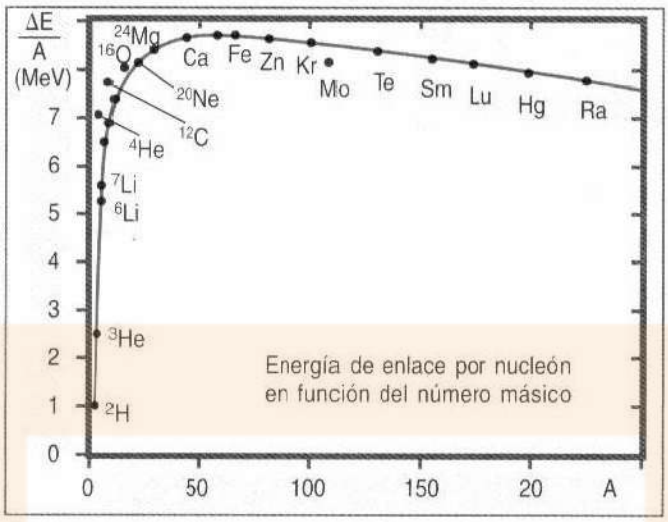


Figura 9.1
Energía de enlace nuclear por nucleón en función del nº másico (en MeV/nucleón)

En la gráfica anterior podemos observar lo siguiente:

1º. La energía de enlace nuclear por nucleón no supera los 9 MeV/nucleón.

2º. La energía de enlace nuclear por nucleón es máxima para aquellos isótopos cuyos números másicos están comprendidos entre 40 y 80 aproximadamente y, por tanto, estos núcleos son los más estables.

3º. Si tomamos dos núcleos ligeros y los unimos para formar un solo núcleo, este, según la gráfica, tendrá mayor energía de enlace por nucleón que los dos iníciales y, por tanto, en el proceso se habrá liberado energía. A este proceso se le denomina **fusión nuclear**.

4º. Si tomamos un núcleo pesado y lo dividimos en dos más ligeros, estos dos, según la gráfica, tendrán más energía de enlace por nucleón que el inicial y, por tanto, en el proceso también se habrá liberado energía. A este proceso se le denomina **fisión nuclear**.

Otro factor que colabora en estabilizar a un núcleo es el número de neutrones. En los núcleos ligeros se observa que el número de neutrones es aproximadamente igual al número de protones: Z = A-Z (figura 9.2). Sin embargo, en los núcleos más pesados, el número de neutrones se hace mayor: A-Z > Z para compensar la mayor repulsión electrostática.

Selectivitat.io

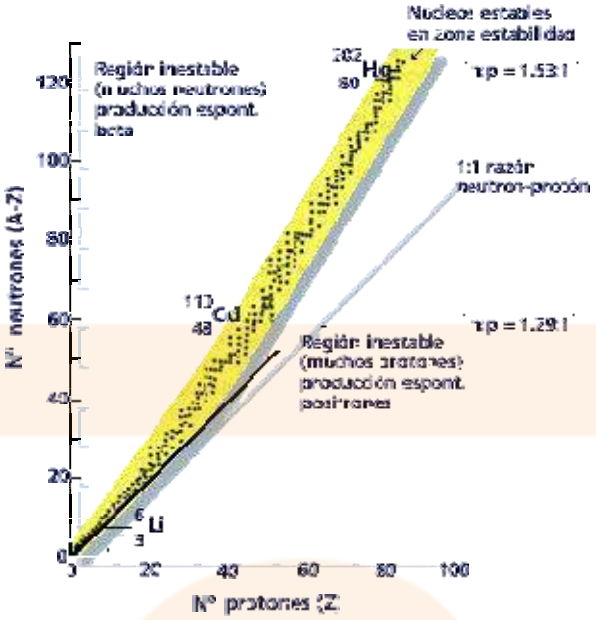


Figura 9.2

<u>Ejemplo 1º</u>

Para el isótopo $^{24}_{12}\mathrm{Mn}$ calcula:

a) El defecto de masa nuclear del Mn-24 e interpreta el resultado obtenido.
b) La energía de enlace nuclear del Mn-24 e interpreta el resultado.
c) La energía de enlace nuclear por nucleón del Mn-24 e interpreta el resultado.
d) Calcula la energía mínima que habría que aportar a 10 g de Mn-24 para descomponer a todos sus núcleos.
e) ¿Qué núcleo es más estable, el Mn-24 o el Mn-25?

Datos: m_{p+} = 1,0073 u m_n = 1,0087 u $^{24}_{12}\mathrm{Mn}$ = 23,9850 u $^{25}_{12}\mathrm{Mn}$ = 24,9858 u 1 u = 1,67.10^{-27} Kg

Selectivitat.io

3. RADIACTIVIDAD: DESCRIPCIÓN DE LOS PROCESOS ALFA, BETA Y GAMMA

Una propiedad fundamental de los núcleos atómicos es que algunos son estables, mientras que otros no lo son. Los núcleos inestables se transforman en otros emitiendo espontáneamente partículas y radiaciones características.

Se denomina radiactividad a la transformación espontánea de los núcleos de los isótopos inestables en isótopos de otro o de ese mismo elemento acompañada de la emisión de ciertas partículas y/o de energía en forma de radiación. La radiactividad natural es la que tiene lugar en los isótopos inestables existentes en la naturaleza. La radiactividad artificial es la que se produce en los isótopos inestables que aparecen en las reacciones nucleares efectuadas por el hombre.

La radiactividad fue descubierta en 1896 por el físico francés A. H. Becquerel (1852-1908). Becquerel 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. Acababan de descubrir la *radiactividad*, nombre propuesto por Marie Curie (1867-1934) para dicho fenómeno.

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.

Rutherford, a principios del siglo XX, sometió a la radiación emitida por los núcleos radiactivos a campos electromagnéticos y comprobó que no todas las radiaciones emitidas eran iguales. Fundamentalmente existen tres tipos de radiaciones: **la radiación alfa, la beta y la gamma.** Como veremos a continuación, las dos primeras radiaciones realmente son partículas, mientras que la tercera es energía en forma de oem (figura 9.3).

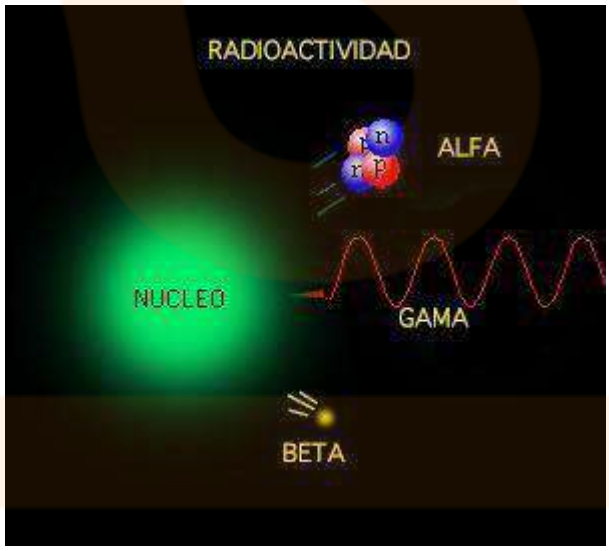


Figura 9.3

Selectivitat.io

- **Radiación alfa**

La radiación α es un proceso en el que un núcleo radiactivo emite un núcleo de He-4, es decir, emite dos protones y dos neutrones.

Las características de una partícula α, que denotaremos como ${}^{4}_{2}\alpha$, son:

Carga eléctrica: $q_\alpha = +2 \cdot q_{p+} = 2.e = 2.1{,}6.10^{-19}$ C = $+3{,}2 \cdot 10^{-19}$ C
Masa: $m_\alpha = 2m_{p+} = 6{,}7 \cdot 10^{-27}$ kg

Cuando un núcleo radiactivo emite una partícula alfa, el núcleo resultante disminuye su nº atómico en dos unidades y su nº másico en cuatro unidades. A esto se le llama la **ley de Soddy**.

La emisión de una partícula α por un núcleo radiactivo se puede representar mediante la siguiente expresión:

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He $$

Como podemos fácilmente apreciar, después de una emisión α, el núcleo resultante pertenece a un isótopo del elemento que ocupa dos posiciones anteriores en la tabla periódica respecto al núcleo radiactivo inicial.

La emisión de partículas α es característica de los núcleos pesados y son emitidas con una energía cinética del orden del MeV. Esto supone que las partículas α tienen un pequeño poder de penetración en la materia y, de hecho, pueden ser detenidas por una lámina de cartón y no pueden atravesar la piel del cuerpo humano. Estas partículas no son perjudiciales.

Radiación beta

Cuando un núcleo radiactivo emite una partícula β, en realidad lo que está emitiendo es un electrón rápido. El electrón que emite el núcleo procede de un neutrón (${}^{1}_{0}n$) del núcleo que se desintegra, dando lugar a un protón (${}^{1}_{1}p$) y a un electrón (${}^{0}_{-1}e = {}^{0}_{-1}\beta$), que es el que emite.

Las características de una partícula β, que denotaremos ${}^{0}_{-1}\beta$, son las de un electrón:

Carga eléctrica: $q = -e = -1{,}6 \cdot 10^{-19}$ C
Masa: $m = 9{,}11 \cdot 10^{-31}$ kg

Cuando un núcleo radiactivo emite una partícula β, el núcleo resultante aumenta su nº atómico en una unidad pero no varía el nº másico. A esto se conoce con el nombre de **ley de Fajans**.

La emisión de una partícula β por parte de un núcleo radiactivo se puede representar mediante la siguiente expresión:

$$ {}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}\beta \ \ (\text{ó } {}^{0}_{-1}e) $$

Como puede apreciarse, el núcleo resultante pertenece a un isótopo del elemento siguiente en la tabla periódica.

Selectivitat.io

Su energía cinética es del orden del MeV, pero como su masa es mucho más pequeña que las de las partículas α, tienen un mayor poder de penetración en la materia. Pueden atravesar el cuerpo humano, siendo detenidas por chapas metálicas delgadas. No son perjudiciales para la salud.

Selectivitat.io

- **Radiación gamma**

Cuando un núcleo radiactivo emite radiación ϒ, está emitiendo energía en forma de ondas electromagnéticas de mayor frecuencia que los rayos X. Por tanto, carecen tanto de carga eléctrica como de masa.

La explicación de esta emisión se basa en que los núcleos, igual que los átomos, pueden estar en estados energéticos definidos, de modo que si un núcleo está en un estado energético por encima de su estado fundamental (estado excitado), emite la diferencia de energía entre ambos estados en forma de radiación ϒ.

Como podemos apreciar, cuando un núcleo radiactivo emite radiación ϒ, el núcleo no se transforma en otro núcleo diferente, sino que sigue siendo el mismo isótopo pero en un estado de energía inferior, es decir, es energéticamente más estable (recordemos que cuando un núcleo radiactivo emite una partícula α ó β, sí se produce una verdadera transmutación nuclear).

La emisión de radiación ϒ por parte de un núcleo radiactivo se puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$^{Æ}_{Z}X^{*} \rightarrow {}^{Æ}_{Z}X + \Upsilon$$

La radiación ϒ es de alta energía (como dijimos en la última pregunta del tema 7), entre el keV y el MeV, pudiendo atravesar el cuerpo humano y gruesas chapas metálicas, siendo detenidas por una gruesa pared de hormigón. En la naturaleza existe esta radiación a la que nuestro organismo se ha adaptado, pero un aumento de la densidad de esta radiación junto con una exposición prolongada a ella causa graves perjuicios en los seres vivos.

Para finalizar, hay que destacar que generalmente un núcleo radiactivo no emite un solo tipo de radiación, sino que puede emitir sucesivamente varias partículas α y/o varia partículas β y/o varias radiaciones ϒ, es decir, 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**.

<u>Ejemplo 3º</u>

El radio 226 ($^{226}_{88}Ra$) emite sucesivamente 3 partículas α y dos partículas β. Escriben las correspondientes ecuaciones que representan dichas emisiones.

$$^{226}_{88}Ra \rightarrow {}^{222}_{86}Rn + {}^{4}_{2}\alpha$$

$$^{222}_{86}Rn \rightarrow {}^{218}_{84}Po + {}^{4}_{2}\alpha$$

$$^{218}_{84}Po \rightarrow {}^{214}_{82}Pb + {}^{4}_{2}\alpha$$

$$^{214}_{82}Pb \rightarrow {}^{214}_{83}Bi + {}^{0}_{-1}\beta$$

$$^{214}_{83}Bi \rightarrow {}^{214}_{84}Po + {}^{0}_{-1}\beta$$

Selectivitat.io

4. LEY DE DESINTEGRACIÓN RADIACTIVA: PERIODO DE SEMIDESINTEGRACIÓN RADIACTIVA, VIDA MEDIA Y ACTIVIDAD

Cuando un núcleo atómico emite radiación α, β ó ϒ, el núcleo cambia de estado o bien se transforma (transmuta) en otro distinto. En este último caso se dice que ha tenido lugar una **desintegración radiactiva**. Debido al gran nº de núcleos existentes en cualquier muestra radiactiva, la desintegración radiactiva es un **proceso aleatorio** gobernado por leyes estadísticas.

Experimentalmente se sabe que la desintegración radiactiva sigue la siguiente ley de decrecimiento exponencial:

$$\boxed{N = N_0 \cdot e^{-h \cdot t}} \quad [9.4]$$

Siendo:

N_0 al número de núcleos radiactivos iniciales.
N al nº de núcleos radiactivos que aún no se han desintegrado transcurrido un tiempo t.
λ una constante característica de cada isótopo radiactivo denominada ***CONSTANTE DE DESINTEGRACIÓN* RADIACTIVA** que se mediría en unidades de tiempo elevadas a -1, es decir, en el SI de unidades se mediría en s^{-1}.

Como puede observarse, la el ritmo de desintegración de los núcleos radiactivos presentes en la muestra será mayor cuanto más elevado sea el valor de λ.

En la figura 9.4 se muestra la representación gráfica correspondiente a la ley de desintegración radiactiva.

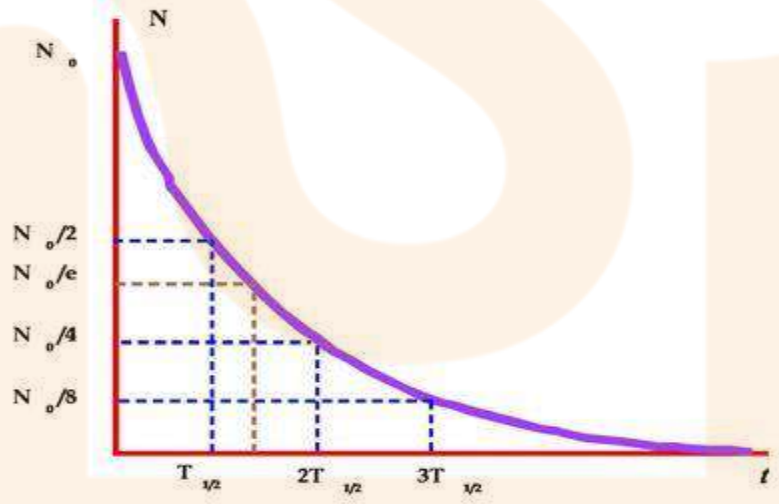


Figura 9.4
Ley de desintegración radiactiva

Se denomina **periodo de desintegración radiactiva o semivida** al tiempo que ha de transcurrir para que se desintegren la mitad de los núcleos radiactivos iniciales, es decir, para que en la muestra sólo quede el 50% de los núcleos radiactivos iniciales.

El periodo de desintegración radiactiva lo podemos calcular del siguiente modo:

Selectivitat.io

$$N = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \Rightarrow \frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot T_{1/2}} \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda \cdot T_{1/2}} \Rightarrow \mathrm{Ln}\frac{1}{2} = \mathrm{Ln}(e^{-\lambda \cdot T_{1/2}})$$

$$\Rightarrow \mathrm{Ln}\frac{1}{2} = -\lambda \cdot T_{1/2} \cdot \mathrm{Ln}(e) \Rightarrow \mathrm{Ln}\frac{1}{2} = -\lambda \cdot T_{1/2} \Rightarrow -\mathrm{Ln}2 = -\lambda \cdot T_{1/2} \Rightarrow$$

$$\boxed{T_{1/2} = \frac{\mathrm{Ln}2}{\lambda}} \quad [9.5]$$

No hay que confundir el periodo de desintegración radiactiva de un núclido con la vida media de dicho núclido. **La vida media** de un isótopo radiactivo es el tiempo medio que tarda un núcleo al azar en desintegrarse. Su unidad en el S.I. es el segundo (s) y viene dada por la expresión:

$$\boxed{\tau = \frac{1}{h} = \frac{T_{1/2}}{\ln 2}} \quad [9.6]$$

Se llama **actividad (A) o velocidad de desintegración** de una muestra radiactiva a la rapidez con la que dicha muestra radiactiva se desintegra por unidad de tiempo, es decir, al número de emisiones o desintegraciones de una sustancia radiactiva por unidad de tiempo. La actividad de una muestra radiactiva se calcula multiplicando la constante de desintegración radiactiva (λ) por el nº de núcleos radiactivos (N) presentes en la muestra en cada instante.

$$\boxed{A = \lambda \cdot N} \quad [9.7]$$

Démonos cuenta de que la actividad decrece exponencialmente con el tiempo ya que, el nº de núcleos radiactivos (N) presentes en la muestra, así lo hace.

En el S.I. la actividad se mide desintegraciones dividido por segundo y, a esta unidad, se le da un nombre especial, es el *becquerel* (Bq).

Otra unidad para la actividad es el curie (Ci):

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

IMPORTANTE:

La ley de desintegración radiactiva descrita en la ecuación 9.4, también puede escribirse en términos de masa:

$$m = m_0 \cdot e^{-h \cdot t}$$

siendo m_0 la masa inicial de la muestra radiactiva y m la masa de los núcleos que aún no se han desintegrado en un cierto tiempo t.

La actividad sigue también la misma ley de decrecimiento exponencial:

$$A = A_0 \cdot e^{-h \cdot t}$$

siendo A_0 la actividad inicial de la muestra radiactiva y A la actividad al cabo de un cierto tiempo t.

Selectivitat.io

Ejemplo 4º

Disponemos de una muestra radiactiva de 80 mg de ^{222}Rn que tiene una constante de desintegración radiactiva de 0,182 dias^{-1}. Calcula:

a) La masa que quedará sin desintegrar al cabo de una semana.
b) El periodo de semidesintegración radiactiva. ¿Qué indica este valor?
c) La vida media del radón.
d) El tiempo que debe de transcurrir para que queden 5 mg.
e) La actividad de la muestra al cabo de dos semanas.

Ejemplo 5º

En una excavación arqueológica se ha encontrado una herramienta de madera de roble. Sometida a la prueba del C-14 se observa que presenta una actividad de 100 desintegraciones/h, mientras que una muestra de madera de roble actual presenta una actividad de 600 desintegraciones/h.
Sabiendo que el periodo de semidesintegración del C-14 es de 5730 años, calcula la antigüedad de la herramienta.

Ejemplo 6º

La actividad del isótopo ^{14}C contenido en la madera de un sarcófago resulta ser el 60% de la que tiene la madera actual. Data la antigüedad del sarcófago-

Selectivitat.io

5. REACCIONES NUCLEARES

Las **reacciones nucleares** son procesos en los que intervienen directamente los núcleos atómicos transformándose en otros distintos.

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

$$^{14}_{7}\mathrm{N} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{17}_{8}\mathrm{O} + ^{1}_{1}\mathrm{H}$$

En toda reacción nuclear se cumplen los siguientes principios de conservación:

- **Conservación de la carga eléctrica:** Significa que la suma de los números atómicos es constante, es decir, dicha suma ha de coincidir en reactivos y productos.
- **Conservación del número de nucleones:** Significa que la suma de los números másicos es constante, es decir, dicha suma ha de coincidir en reactivos y productos.
- **Conservación de la energía y de la masa equivalente:** Significa que la energía, E, puesta en juego en la reacción tiene su origen en la diferencia de masa, Δm, que se produce entre los reactivos y los productos. El valor de dicha energía viene dado por el principio de equivalencia entre la energía y la masa de Einstein:

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

donde:

$$\Delta m = \Sigma m_{reactivos} - \Sigma m_{productos}$$

representa el defecto de masa de los productos con respecto a los reactivos.

Por tanto:

9.5 Si $\Delta m > 0$, $E > 0$ y la reacción será exoenergética, es decir, desprende energía (es la situación más común).

9.6 Si $\Delta m < 0$, $E < 0$ y la reacción será endoenergética, es decir, absorbe energía.

Las reacciones nucleares más comunes son las reacciones de **fisión** y las de **fusión**.

Selectivitat.io

6. FISIÓN Y FUSIÓN NUCLEARES

Recordemos que la energía de enlace nuclear por nucleón es un buen indicador para comparar la estabilidad entre los núcleos. Además vimos que la energía de enlace por nucleón varía con el número másico según la curva de la figura 9.1.

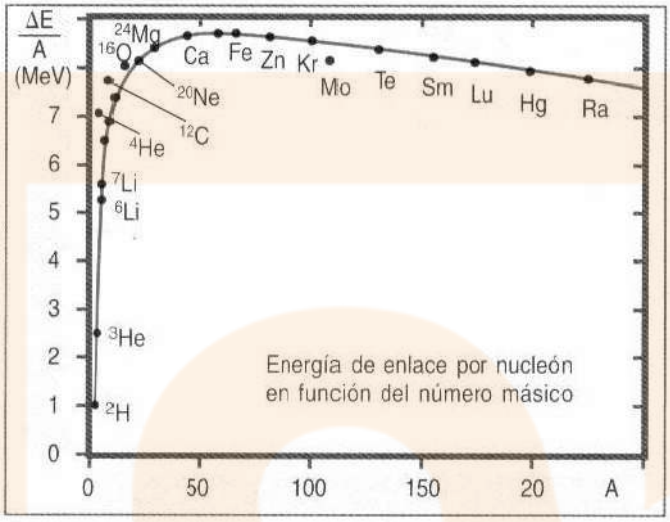


Figura 9.1

Entre otras cosas podía deducirse que:

1º. Si tomamos dos núcleos ligeros y los unimos para formar un solo núcleo, este, según la gráfica, tendrá mayor energía de enlace por nucleón que los dos iníciales y, por tanto, en el proceso se habrá liberado energía. A este proceso se le denomina **fusión nuclear**.

2º. Si tomamos un núcleo pesado y lo dividimos en dos más ligeros, estos dos, según la gráfica, tendrán más energía de enlace por nucleón que el inicial y, por tanto, en el proceso también se habrá liberado energía. A este proceso se le denomina **fisión nuclear**.

Fisión nuclear

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

La fisión nuclear es una reacción exoenergética dado que los productos son núcleos más ligeros y, según la curva de la figura 9.1, energéticamente más estables que el núcleo original; así pues, dicha reacción presenta un defecto de masa positivo. Por otro lado, el uso de neutrones, se debe fundamentalmente, al hecho de que carecen de carga eléctrica, evitándose la posible repulsión electrostática por parte del núcleo a fisionar al acercarse a éste.

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

$$^{235}_{92}\mathrm{U} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{141}_{56}\mathrm{Ba} + ^{92}_{36}\mathrm{Kr} + 3\,^{1}_{0}\mathrm{n}$$

Selectivitat.io

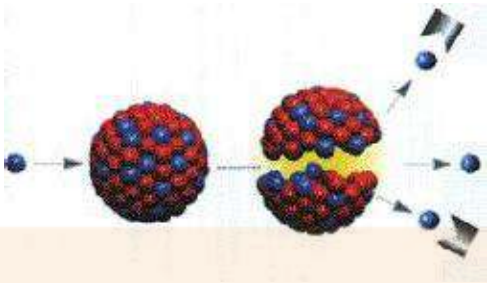


Figura 9.4
Fisión nuclear

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

A pesar de que el uranio-235 es energéticamente menos estable 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 elevada masa atómica, como son el uranio-235 y el plutonio-239.

Los neutrones liberados por la fisión de un núcleo pueden fisionar otros núcleos dando lugar a una **reacción nuclear en cadena**. La primera de éstas la produjo Fermi en 1942 y pueden ser de dos tipos:

- **Controlada**: si el exceso de neutrones liberados son absorbidos por un material específico (barras de plomo); se produce en centrales nucleares y en generadores auxiliares de submarinos y cohetes.
- **No controlada**: si no existe ningún elemento controlador que absorba los neutrones en exceso, por lo que la reacción tiene lugar de forma explosiva; se produce en las bombas atómicas.

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

Fusión nuclear

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

La fusión nuclear es una reacción exoenergética dado que los productos son núcleos más pesados y, según la curva de la figura 9.1, energéticamente más estables que el núcleo original; así pues, dicha reacción presenta un defecto de masa positivo.

Selectivitat.io

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

$$^{2}_{1}H + ^{3}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{1}_{0}n$$

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.

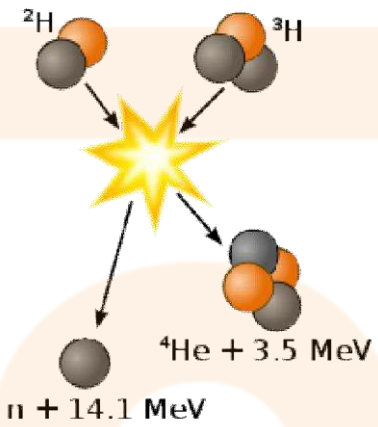


Figura 9.5
Fusión nuclear

Tal como sucede en la fisión, para iniciar un proceso de fusión nuclear es necesaria una **energía de activación**. En este caso, la energía necesaria para que los núcleos se unan venciendo las repulsiones electrostáticas es proporcionada por una energía térmica muy elevada, correspondiente a temperaturas superiores a 10^6 K. A estas temperaturas, los átomos se ionizan y se crea el estado de **plasma**, formado por una "sopa" de núcleos y electrones.

Los núcleos de pequeña masa atómica, como los isótopos del hidrógeno, son los más adecuados para producir la fusión nuclear.

Las reacciones de fusión (también llamadas termonucleares) tienen lugar de forma natural en el Sol y las estrellas, gracias a las altas temperaturas de su interior. De forma artificial, el ser humano ha conseguido la fusión en cadena de forma explosiva, que puede ser:

- **Controlada**: aún no se ha conseguido de forma rentable debido a la dificultad técnica que supone confinar y mantener el plasma estable durante el tiempo suficiente; actualmente hay varios proyectos relacionados con la fusión nuclear controlada como el europeo ITER.
- **No controlada**: se produce en la bomba de hidrógeno (bomba H); la energía para inicial la fusión se obtiene de la explosión de una bomba atómica de fisión.

La fusión controlada presenta múltiples ventajas frente a la fisión:
- Existen grandes reservas de combustible ya que los isótopos del hidrógeno se obtiene de los océanos.
- Se obtiene una energía más de tres veces mayor que en la fisión.
- No se producen residuos contaminantes.

Ejemplo 7º

En un reactor de fisión nuclear tiene lugar la reacción de nuclear siguiente:

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{90}_{38}Sr + ^{136}_{Z}Xe + a^{1}_{0}n$$

a) Descubre el nº atómico del Xe y el nº de neutrones liberados en cada núcleo de uranio-235 fisionado indicando las leyes de conservación que utilizas para ello.
b) Comprueba que es una reacción exoenergética.
c) ¿Qué energía se libera cuando se fisiona un núcleo de uranio-235?
d) Calcula la energía que se liberaría al fisionar 1 g de uranio-235.
e) Calcula la masa de uranio-235 que se consumiría por hora en una central nuclear de 800 Mw.

Datos: $m(^{235}U)$ = 235,043944 u $m(^{90}Sr)$ = 89,907167 u $m(^{136}Xe)$ = 135,907294 u

m_n = 1,008665 u 1 u = $1,67.10^{-27}$ Kg

Ejemplo 8º

El proyecto europeo ITER (Reactor Termonuclear Experimental Internacional) fue puesto en marcha en 1988 y, aunque el organismo europeo tiene su sede en Barcelona, sus instalaciones experimentales están en Cadarache (Francia), investiga la fusión de deuterio y tritio para dar Helio-4.

a) Escribe la reacción nuclear correspondiente
b) Comprueba que es una reacción exoenergética.
c) Calcula la energía liberada por cada núcleo de helio formado.

Masas nucleares: deuterio = 2,0136 u; tritio = 3,0155 u; helio-4 = 4,0015 u; neutrón = 1,0087 u

Selectivitat.io

7. PRINCIPALES INTERACCIONES EN LA NATURALEZA

Todas las fuerzas conocidas hasta ahora en la naturaleza se han podido unificar en cuatro grupos:

- Interacción gravitatoria
- Interacción electromagnética
- Interacción nuclear fuerte
- Interacción nuclear débil

Las principales características de cada una de estas interacciones son:

Interacción gravitatoria

La fuerza de atracción gravitatoria entre dos masas viene dada por la **ley de gravitación universal** que dice:

"La fuerza con que se atraen dos masa puntuales (M y m) separadas por una distancia r es directamente proporcional a los valores de dichas masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa"

$$\vec{F} = -G\frac{M_1 \cdot M_2}{r^2}\vec{U}_r$$ (vector fuerza)

$$F = G\frac{M_1 \cdot M_2}{r^2}$$ (módulo del vector fuerza)

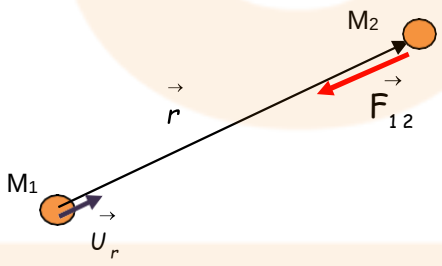
Donde:

G = 6,67·10^{-11} N m^2 kg^{-2} es la llamada constante de gravitación universal

"r" es módulo del vector $\vec{r}$ (que es la distancia que separa a las dos masas que interaccionan)

El vector $\vec{r}$ es el vector que va de la masa fuente a la masa testigo

Y $\vec{u}_r = \frac{\vec{r}}{r}$ es un vector unitario de la misma dirección y sentido que el vector $\vec{r}$ y por tanto un vector unitario dirigido de la masa fuente a la masa testigo (fig. 1.2).



Las principales características de la fuerza gravitatoria son:

- Es una fuerza universal ya que se debe a la masa de los cuerpos.
- Es una fuerza de atracción.
- Es una fuerza central porque su dirección coincide con la dirección de la recta que une las dos masas que interaccionan.
- La fuerza gravitatoria es una fuerza de largo alcance porque se manifiesta tanto a cortas distancias como a largas distancias.

Selectivitat.io

- La atracción gravitatoria entre dos masas también es independiente del medio en el que se encuentren puesto que G es una constante universal, es decir, su valor no depende del medio en el que se encuentren las masas que interaccionan.
- Debido al pequeño valor de G la fuerza de atracción gravitatoria entre dos masas sólo es apreciable en el caso en que al menos una de las dos masas sea de valor elevado.
- Es una fuerza cuyo valor disminuye con el cuadrado de la distancia que separa a las masas que interaccionan (es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia), lo que permite demostrar, junto con su carácter central, que se trata de una fuerza conservativa y, por tanto, tendrá asociada una energía potencial.

Interacción electromagnética

Es la fuerza de interacción entre cuerpos cargados eléctricamente. Habría que distinguir entre la fuerza electrostática y la fuerza magnética.

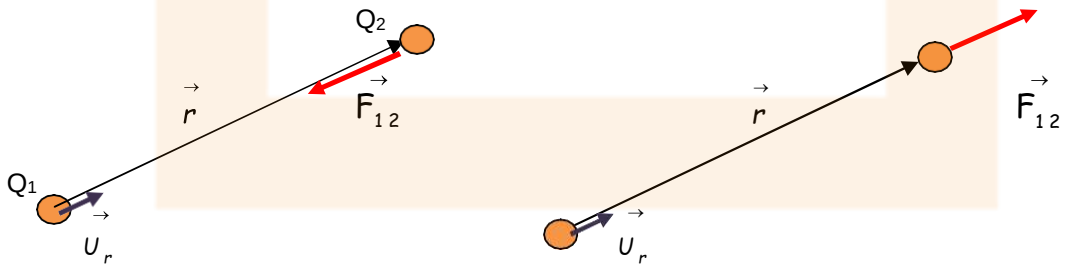
La fuerza electrostática se manifiesta tanto si las cargas que interaccionan están en reposo o en movimiento. La fuerza magnética entre cargas sólo se manifiesta si estas están en movimiento.

La fuerza electrostática viene dada por **la Ley de Coulomb**, que dice:

"La fuerza con que se atraen o se repelen dos cuerpos cargados es directamente proporcional al producto de dichas cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa".

$\vec{F} = K \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2} \vec{U}_r$ vector fuerza electrostática $F = K \frac{|Q_1| \cdot |Q_2|}{r^2}$ módulo del vector

Donde:
K es la llamada constante eléctrica.
"r" es módulo del vector $\vec{r}$ (que es la distancia que separa a las dos cargas que interaccionan)
El vector $\vec{r}$ es el vector que va de la carga fuente a la carga testigo
Y $\vec{u}_r = \frac{\vec{r}}{r}$ es un vector unitario de la misma dirección y sentido que el vector $\vec{r}$ y por tanto un vector unitario dirigido de la carga fuente a la carga testigo.



Cargas de distinto signo Cargas del mismo signo

Figura 3.9

La fuerza electrostática tiene las siguientes características:

- No es una fuerza universal ya que se da sólo entre cuerpos cargados.

Selectivitat.io

- Es una fuerza de atracción (cargas de distinto signo), o de repulsión (cargas del mismo signo).
- Es una fuerza central porque…..
- Es una fuerza de largo alcance.
- La interacción eléctrica entre dos cargas sí depende del medio en el que se encuentran dichas cargas ya que el valor de la constante eléctrica K no es una constante universal puesto que su valor depende del medio interpuesto entre las cargas que interaccionan.
- La constante eléctrica es máxima en el vacío y vale aproximadamente:

$$K(\text{vacío}) = K_0 = 9\cdot10^9 \text{ N m}^2 \text{ C}^{-2}$$

  Por tanto la interacción eléctrica entre dos cargas es máxima cuando estas están en el vacío, y disminuye cuando se encuentran en un medio material.
- Es una fuerza cuyo valor disminuye con el cuadrado de la distancia que separa a las cargas que interaccionan (es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia), lo que permite demostrar, junto con su carácter central, que se trata de una fuerza conservativa y, por tanto, tendrá asociada una energía potencial.

Si las cargas que interaccionan están en movimiento aparece entre ellas la interacción magnética que tiene las siguientes características:

- No es una fuerza universal ya que se da sólo entre cuerpos cargados y en movimiento.
- Puede ser de atracción o de repulsión.
- No es una fuerza central.
- Es una fuerza de largo alcance.
- La interacción magnética también depende del medio en el que se encuentran las cargas que interaccionan. Esta dependencia se establece a través de la denominada permeabilidad magnética μ.
- La permeabilidad magnética μ no es máxima en el vacío que vale aproximadamente:

$$\mu\ (\text{vacío}) = \mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7} \text{ UI}$$

  Por tanto la interacción magnética no es máxima en el vacío. En los medios paramagnéticos la interacción magnética es menor que en el vacío y en los medios diamagnéticos y ferromagnéticos es mayor.
- Es una fuerza cuyo valor disminuye con la distancia que separa a las cargas que interaccionan, pero no es una fuerza conservativa.

Interacción nuclear fuerte

La interacción nuclear fuerte es la responsable de la estabilidad de los núcleos y presenta las siguientes características:

- Es la responsable de la cohesión del núcleo.
- Es una fuerza atractiva que se manifiesta entre los nucleones con independencia de su carga eléctrica.
- Es una fuerza muy intensa ya que debe de vencer a la fuerte repulsión electrostática entre los protones.
- Es de muy corto alcance ya que sólo se manifiesta a distancias inferiores al tamaño del núcleo (10^{-15} m).
- Aunque es una fuerza de atracción, cuando la separación entre los nucleones es mucho menor a su alcance, se convierte en una fuerza de repulsión para impedir el colapso entre los nucleones.
- Es una fuerza conservativa, y por tanto tiene asociada una energía potencial que es la energía de enlace nuclear.

Selectivitat.io

- Su valor depende de la orientación del espín de los nucleones.

Interacción nuclear débil

Es una fuerza de corto alcance puesto que se manifiesta también a nivel nuclear y explica la existencia de núcleos radiactivos que se desintegran emitiendo radiación β. Es una fuerza de poca intensidad.

Las investigaciones en Física Fundamental van encaminadas a conocer cada vez mejor a cada una de estas fuerzas y a la búsqueda de la "Teoría de la gran unificación", en la que estas cuatro fuerzas pudieran ser descritas mediante una sola ley.

Selectivitat.io