



# UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y  
NATURALES

## ***RADIATIVIDAD***

REACTOR NUCLEAR RA-0

<b><u>ESTRUCTURA ATÓMICA</u></b>	<b>3</b>
<b><u>NÚMERO ATÓMICO Y NUMERO MASICO</u></b>	<b>3</b>
<b><u>NUCLEÍDO</u></b>	<b>3</b>
<b><u>ISÓTOPOS</u></b>	<b>4</b>
<b><u>ISÓTONOS</u></b>	<b>4</b>
<b><u>ISÓMEROS</u></b>	<b>4</b>
<b><u>ISÓBAROS</u></b>	<b>4</b>
<b><u>EQUIVALENCIA ENTRE MASA Y ENERGÍA</u></b>	<b>5</b>
<b><u>RADIATIVIDAD</u></b>	<b>6</b>
<b>LAS PARTÍCULAS ALFA</b>	<b>7</b>
<b>LAS PARTÍCULAS BETA</b>	<b>7</b>
<b>LAS PARTÍCULAS GAMMA</b>	<b>8</b>
<b><u>INTERACCIÓN CON LA MATERIA</u></b>	<b>9</b>
<b>DESINTEGRACIÓN ALFA</b>	<b>9</b>
<b>DESINTEGRACIÓN BETA:</b>	<b>12</b>
<b>DESINTEGRACIÓN <math>\beta^+</math></b>	<b>15</b>
<b>DESINTEGRACIÓN GAMMA. ISOMERÍA NUCLEAR</b>	<b>17</b>
• EFECTO FOTOELÉCTRICO	18
• EFECTO COMPTON	19
• FORMACIÓN DE PARES	19
<b><u>LEYES DE DESINTEGRACIÓN RADIATIVA</u></b>	<b>20</b>

## ESTRUCTURA ATÓMICA

El átomo es la fracción más pequeña de un elemento que conserva las propiedades químicas del mismo y es imposible dividir por medio de reacciones químicas. Los átomos se comportan como sistemas solares en miniatura: un pequeño "sol", el núcleo, está rodeado por los "planetas" orbitales llamados electrones. El núcleo tiene tan solo la cienmilésima parte del tamaño del átomo, pero es tan denso que contiene casi toda su masa. Es generalmente un conglomerado de partículas que se mantienen estrechamente unidas. Algunas de estas partículas tienen una carga eléctrica positiva y se llaman protones. El número de protones determina al elemento químico al que pertenece el átomo; un átomo de hidrógeno tiene un solo protón; un átomo de oxígeno tiene 8, y un átomo de uranio, 92. Cada átomo tiene el mismo número de electrones orbitales que de protones. Los electrones están cargados negativamente y por ello se neutralizan con los protones, cargados positivamente. Como resultado el átomo no es eléctricamente ni positivo ni negativo, sino neutro. El resto de las partículas en el núcleo se denominan neutrones porque no tienen carga eléctrica. Estas partículas tienen aproximadamente la misma masa que los protones y son importantísimas desde el punto de vista de la Ingeniería Nuclear. En la Fig.1 vemos un esquema simplificado de un átomo.

## NÚMERO ATÓMICO Y NUMERO MASICO

Se le llama **NUMERO ATÓMICO** de un núcleo al número de protones que tiene ese núcleo. El número atómico (en definitiva el número de protones) es lo que determina de qué elemento químico es el núcleo en cuestión; y es por lo tanto la base de la ordenación de la tabla periódica.

El **NUMERO MASICO**, por otra parte, es la suma de protones y neutrones que tiene el núcleo. Un determinado núcleo puede entonces ser identificado utilizando el símbolo correspondiente al elemento químico al que pertenece (U, O, H, etc.), lo cual automáticamente nos proporciona su número atómico; y sumándole a este símbolo el número másico correspondiente, con lo cual tenemos el número de neutrones. El I-131, por ejemplo, tiene 53 protones (si lo buscas en la Tabla Periódica tiene número atómico 53), y como su número másico es 131, quiere decir que tiene 131-53, es decir, 78 neutrones

## NUCLEÍDO

Designaremos con el término nucleido a toda especie nuclear definida por su número atómico, su número másico y su estado energético.

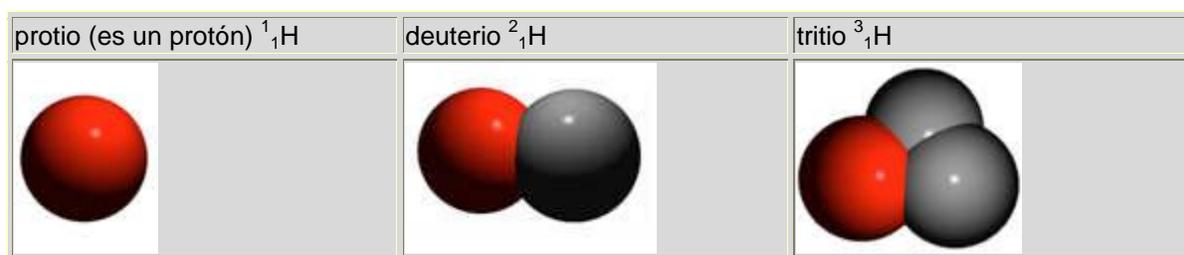
La notación a utilizar es la siguiente



Hay alrededor de 1440 nucleidos conocidos, de los cuales 340 son naturales y alrededor de 1100 se han producido en laboratorio.

## ISÓTOPOS

Los átomos del mismo elemento químico tienen siempre el mismo número de protones en sus núcleos, pero pueden tener un número distinto de neutrones. Aquellos que tienen diferente número de neutrones, pero el mismo número de protones en sus núcleos, pertenecen a distintas variedades del mismo elemento y se denominan " ISÓTOPOS". Los isótopos son, entonces, átomos que tienen el mismo número atómico (número de protones), y diferente número másico (suma del número de protones más neutrones). Así, el Uranio-238 tiene 92 protones y 146 neutrones; el Uranio -235 tiene los mismos 92 protones pero cuenta con 143 neutrones. El Deuterio (H-2) es un isótopo del Hidrógeno; el Hidrógeno cuenta solamente con un protón en su núcleo, mientras que el Deuterio tiene un protón (por eso es Hidrógeno), pero además tiene un neutrón. En la Fig.2 vemos un átomo de Hidrógeno y uno de Deuterio.



## ISÓTONOS

Son nucleidos con el mismo número de neutrones pero distinto Z y A.



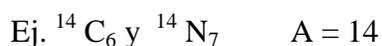
## ISÓMEROS

Son nucleidos con igual Z e igual número de neutrones, por lo tanto igual número másico pero distinto estado energético.



## ISÓBAROS

Son nucleidos con el mismo número de nucleones, A pero distinto Z y número de neutrones.



## EQUIVALENCIA ENTRE MASA Y ENERGÍA

Se puede demostrar que La Masa de un Núcleo, es siempre INFERIOR a la sumatoria de las masas de los núcleos constituyentes.

Esta diferencia de masa recibe el nombre de DEFECTO MÁSSICO y guarda estrecha relación con la energía que mantiene ligadas a las partículas dentro del núcleo.

Matemáticamente puede expresarse:

$$\Delta M = [Z (m_p + m_e) + (A-Z)m_n] - M$$

$$\Delta M = Z \cdot 1,007825 + (A - Z) 1,008665 - M$$

Según el concepto de equivalencia entre masa y energía, el  $\Delta M$  es una medida de la energía que se pondría en libertad si los  $Z$  protones y los  $A - Z$  neutrones individuales se combinaran entre si para formar el núcleo.

Recíprocamente, el  $\Delta M$  es igual a la energía que sería necesaria suministrar al núcleo para romperlo en sus nucleones constituyentes. Por lo tanto,  $\Delta M$  es equivalente a la energía de enlace. Podemos escribir la conocida fórmula

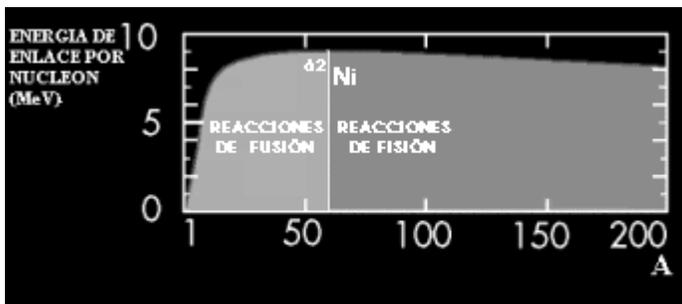
$$\Delta E [\text{Mev}] = 931 \Delta M [\text{uma}]$$

Si  $\Delta E$  es la energía total de enlace,  $\Delta E/A$  es la energía media de enlace por nucleón.

Volviendo a la primera expresión podemos escribirla ahora de la siguiente manera:

$$\Delta E/A = 931/A [1,007825 \cdot Z + 1,008665 (A-Z) - M]$$

Expresión que nos permite calcular la energía media de enlace por nucleón para cualquier núcleo en función del número másico  $A$ .

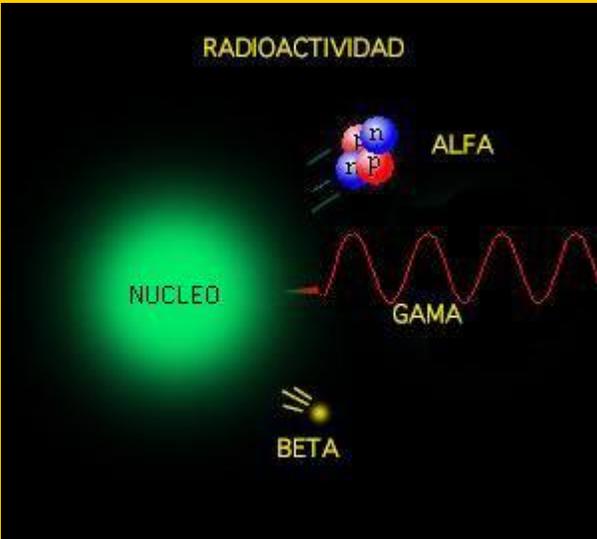


Si bien en los núcleos livianos se observa un aumento abrupto de la energía de enlace por nucleón frente al número másico  $A$ , a partir de  $A=10$ , la energía de enlace por nucleón es prácticamente constante.

El máximo corresponde a núcleos semipesados con  $A=62$  (Fe, Co, Ni), donde las fuerzas de atracción serán máximas. El decrecimiento de la energía para  $A>60$  se debe a la repulsión eléctrica entre los protones cuyo número va aumentando y reduce por tanto la estabilidad de los núcleos. En los núcleos ligeros, cada nucleón es atraído por pocos nucleones, lo que también reduce su estabilidad.

## RADIOACTIVIDAD

En 1896 el físico francés Henry Becquerel descubrió la radioactividad natural, que consiste en el proceso mediante el cual los núcleos atómicos emiten espontáneamente diferentes formas de radiación.



**RADIOACTIVIDAD**

NUCLEO

ALFA

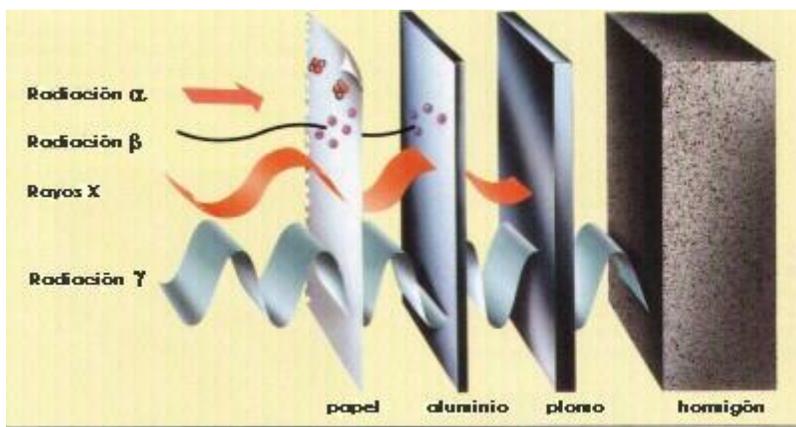
GAMA

BETA

### TIPOS DE RADIACIÓN

- ALFA: núcleos de Helio ( = 2 protones + 2 neutrones)
- BETA: electrones
- GAMA: ondas electromagnéticas

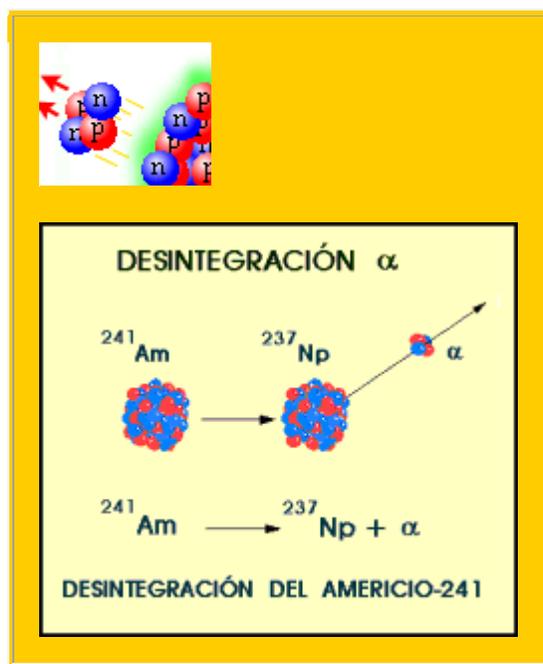
Los núcleos atómicos de una sustancia radiactiva no son estables y se transmutan espontáneamente en otros núcleos emitiendo partículas alfa, beta y gamma.



## Las partículas alfa

Son átomos de He doblemente ionizados, es decir, que han perdido sus dos electrones. Por tanto, tienen dos neutrones y dos protones. Es la radiación característica de isótopos de número atómico elevado, tales como los del uranio, torio, radio, plutonio. Dada la elevada masa de estas partículas y a que se emiten a gran velocidad por los núcleos (su velocidad es del orden de  $10^7$  m/s), al chocar con la materia pierden gradualmente su energía ionizando los átomos y se frenan muy rápidamente, por lo que quedan detenidas con tan sólo unos cm de aire o unas milésimas de mm de agua. En su interacción con el cuerpo humano no son capaces de atravesar la piel. Así pues, tienen poco poder de penetración siendo absorbidos totalmente por una lámina de aluminio de 0.1 mm de espesor o una simple hoja de papel.

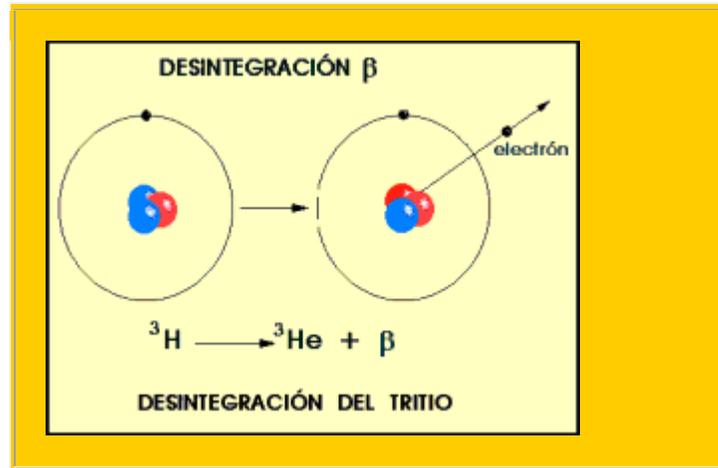
Cuando un núcleo emite una partícula alfa, su número másico se reduce en cuatro unidades y su número atómico en dos unidades. Este proceso se da en átomos con un número atómico elevado.



## Las partículas beta

Son electrones emitidos a grandes velocidades próximas a la de la luz. Debido a la menor masa que la radiación alfa, tienen más poder de penetración que las partículas alfa siendo absorbidas por una lámina de aluminio de 0.5 mm de espesor y quedan frenadas en algunos m de aire, o por 1 cm de agua. En el cuerpo humano, pueden llegar a traspasar la piel, pero no sobrepasan el tejido subcutáneo.

Cuando un núcleo emite una partícula beta (electrón), su número másico permanece invariable y su número atómico aumenta en una unidad. Este proceso se da en núcleos que presentan un exceso de neutrones, por lo que un neutrón se transforma en un protón y en un electrón que es emitido.



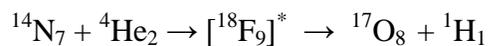
## Las partículas gamma

Son radiaciones electromagnéticas de la misma naturaleza que los rayos X pero de menor longitud de onda. Su poder de penetración es muy elevado frente al de las partículas alfa o beta, pudiendo atravesar el cuerpo humano. Quedan frenadas con espesores de 1 m de hormigón o unos pocos cm de plomo, por lo que cuando se utilizan fuentes radiactivas que emiten este tipo de radiación, hay que utilizar blindajes adecuados.

La radiación en su trayectoria, interacciona con la materia de diferentes maneras pudiendo resumirse sus efectos de acuerdo al siguiente cuadro:

$\alpha$ :

- Produce GRAN IONIZACIÓN
- Produce TRANSMUTACIÓN NUCLEAR



- Su alcance en aire es de pocos centímetros
- Su alcance en agua es de pocos micrones

$\beta$ :

- Producen IONIZACIÓN
- Su alcance en aire es menor a 10 metros

- Su alcance en agua es menor a un milímetro

$\gamma$ :

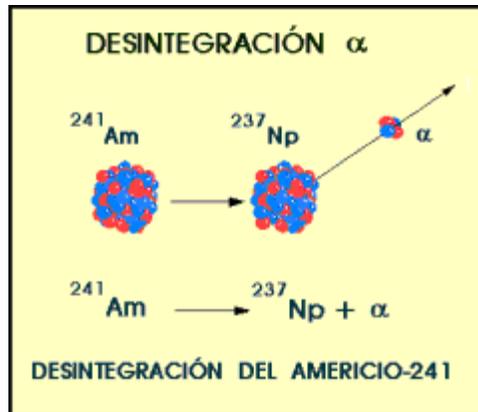
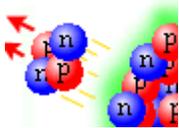
- Es radiación electromagnética
- Su alcance en aire es menor a 100 metros
- Su alcance en agua es menor a 3 metros
- Puede producir IONIZACIÓN INDIRECTA

Las reacciones nucleares dan origen a una gran variedad de reacciones artificiales obteniéndose los siguientes modos de decaimiento radiactivo:

Partículas  $\alpha$ , partículas  $\beta^-$  y  $\beta^+$ , radiación  $\gamma$ , captura electrónica C.E., conversión interna de electrones C.I., neutrones, fisión nuclear, etc.

## INTERACCIÓN CON LA MATERIA

### Desintegración alfa

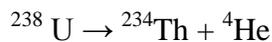


En un núcleo, la fuerza eléctrica repulsiva (o fuerza coulombiana) entre los protones compite con la fuerza atractiva que mantiene unido un núcleo, la fuerza nuclear fuerte. Cuando nos fijamos en núcleos más pesados, con carga nuclear más alta y radio nuclear mayor, la fuerza coulombiana empieza a ser cada vez más importante, ya que su radio de acción es mayor que para las fuerzas nucleares. Cuando la diferencia es suficientemente grande, puede producirse una fisión nuclear, o lo que es más común para núcleos en su estado fundamental, aunque menos espectacular, los núcleos pueden decaer por emisión de partículas alfa.

Un requerimiento para que se produzca una desintegración alfa, y en general cualquier tipo de desintegración, es que el estado final del sistema tenga una masa menor

que la del estado inicial del sistema. En ese caso, la emisión puede en principio ocurrir, porque habrá energía suficiente para proporcionar la energía cinética de las partículas emitidas. En igualdad de condiciones, cuanto más energía disponible tengamos, más corto será el tiempo de vida para la desintegración alfa. Los radionúcleos naturales que emiten partículas alfa son todos *núcleos pesados*, con números atómicos Z por encima de 80. Para estos núcleos, las partículas alfa serán emitidas a un ritmo suficiente para poder ser observados, es decir, con un tiempo de vida suficientemente corto, sólo si la energía disponible no es mucho menor que 4 MeV. Las energías típicas de las partículas alfa están comprendidas entre 4 y 8 MeV.

Un ejemplo típico de decaimiento alfa es el decaimiento del uranio 238 ( $^{238}\text{U}$ ) para formar torio 234 ( $^{234}\text{Th}$ ):



El número másico inicial (238) es igual a la suma de los números másicos de los núcleos finales (234 + 4), y el número atómico inicial (92) es igual a la suma de los números atómicos finales (90 + 2). Estas igualdades están dictadas por dos reglas importantes que se aplican en radiactividad:

**Carga:** *La suma de las cargas de los productos finales es igual a la carga de los núcleos originales.*

**Número de nucleones:** *El número total de nucleones en los productos finales es igual al número total de nucleones en el núcleo original.*

La ecuación que rige un decaimiento alfa es la siguiente:



La energía liberada en el proceso será entonces (supuesto que el núcleo inicial X se encontraba en reposo):

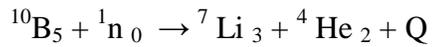
$$Q_\alpha = (M(^A_Z\text{X}) - M(^{A-4}_{Z-2}\text{Y}) - M_\alpha)C^2$$

Esta energía liberada, que ha de ser positiva para que el proceso sea energéticamente posible, se convertirá en energía cinética para los dos núcleos resultantes, el Y y la partícula alfa.

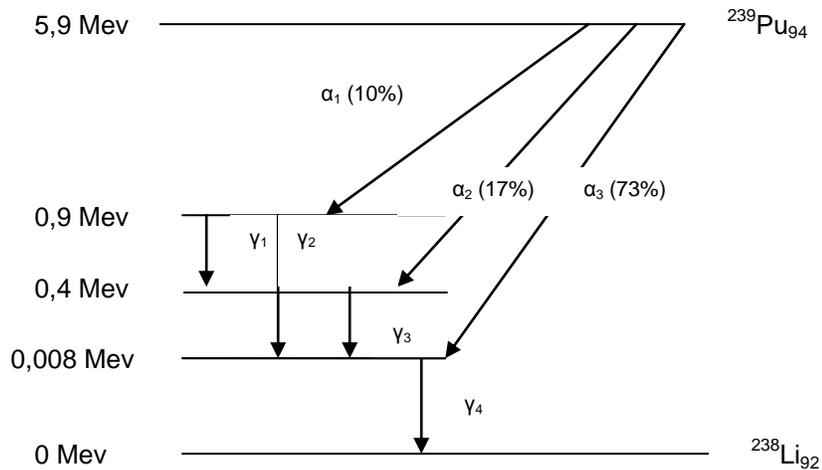
El proceso puede ser espontáneo o inducido:

Desintegración espontánea: Q debe ser mayor que cero. Ocurre en núcleos de masa muy grande. Por Ej. el  $^{238}\text{U}$  visto anteriormente.

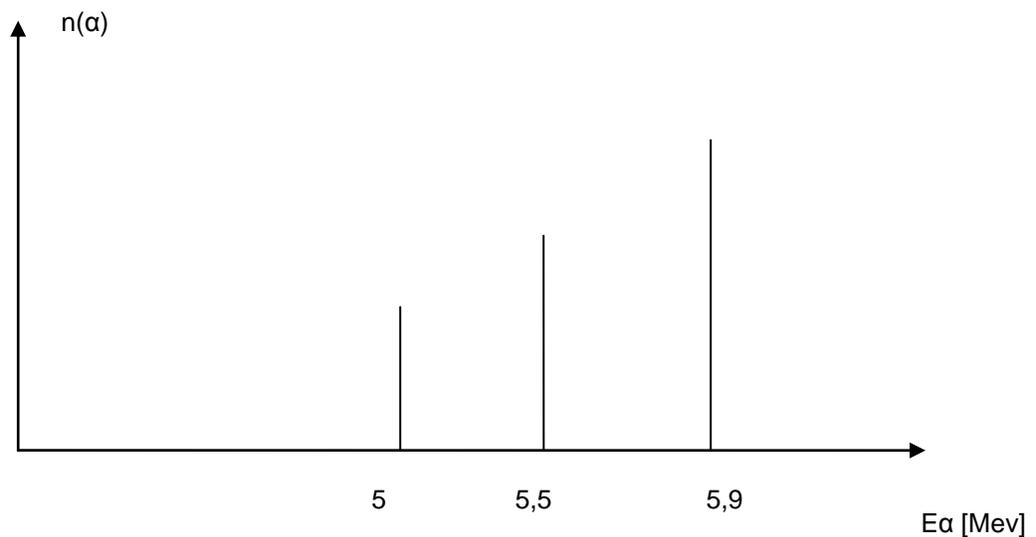
Desintegración inducida: Para que la reacción se produzca debe entregarse energía al sistema. Por Ej.



La emisión alfa es característica de cada nucleido y permite su identificación.



Su espectro característico es:



No siempre el núcleo queda en su estado fundamental al emitir una partícula alfa, sino que, estadísticamente puede emitir grupos de distinta energía y llegar al estado fundamental emitiendo radiación gamma de energía perfectamente definidas.

## Resumiendo:

Las partículas alfa son emitidas fundamentalmente por núcleos pesados de  $A \gg 1$ .

Tienen una gran estabilidad.

Recorren trayectorias rectilíneas. Su alcance en aire oscila entre los 2 y 10 cm según su energía.

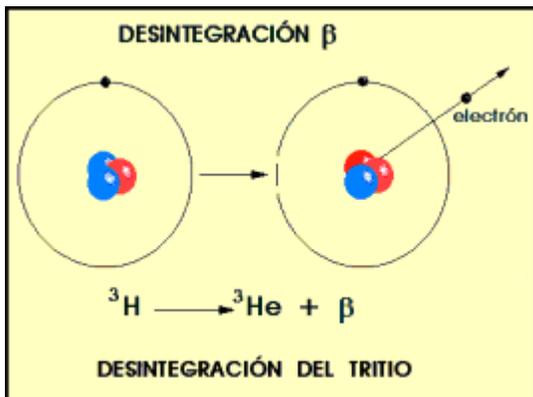
Tienen un alcance bien definido.

Producen GRAN IONIZACIÓN ESPECÍFICA.

No constituyen riesgo por radiación externa.

Si constituye grave riesgo por ingestión e inhalación.

## Desintegración Beta:

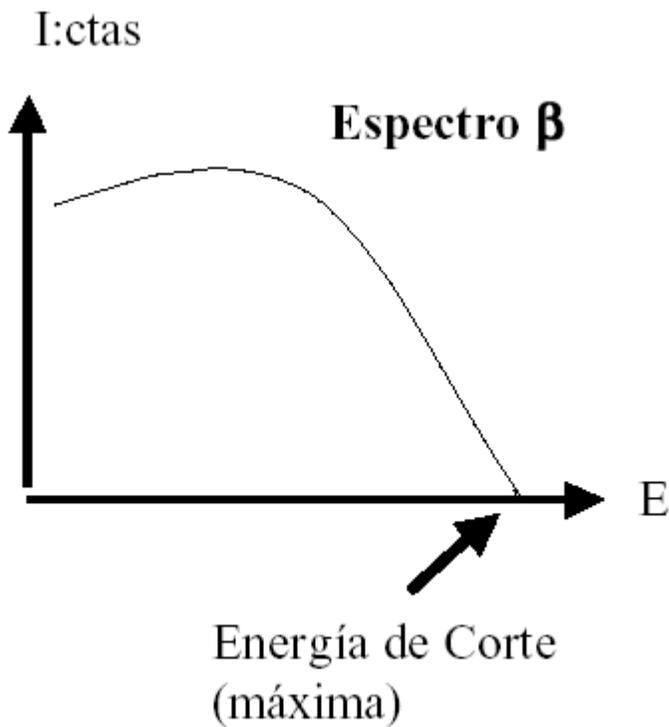


Ocurre con núcleos cuya relación  $N/Z$  es mayor a la que corresponde en la franja de estabilidad, es decir, núcleos ligeros o de masa intermedia.

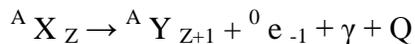
Dentro del núcleo, un neutrón se transforma en un protón (aumentando así su carga eléctrica  $Z$ ) más un electrón de carga negativa el que es emitido fuera del núcleo con gran energía cinética.



A diferencia de las partículas alfa, presenta un espectro continuo de energías, desde energías prácticamente cero hasta una cierta  $E_{\text{máx}}$ . que es característica del radionucleído.



Simbólicamente, podemos escribir



Expresión en la que  $\gamma$  recibe el nombre de neutrino, partícula de carga nula y masa despreciable comparada con la masa del electrón, que comparte en forma aleatoria la energía total disponible con la partícula  $\beta^-$  emitida.

Cuando el neutrino es emitido con energía nula,  $\beta^-$  tendrá energía máxima

$$E_{\beta \text{ máx.}} = Q$$

$$Q = E_{\beta} + E_{\gamma}$$

Haciendo un balance de MASA Y ENERGÍA obtenemos:

$$Q = \Delta M \cdot C^2 = (m_x - m_y - m_{e^-}) C^2$$

$$Q = 931.48 (M_x - M_y)$$

Para que la desintegración se produzca en forma espontánea, debe ser  $Q > 0$  por lo que debe verificarse que

$$M_x > M_y$$

es decir que, la masa atómica del átomo a desintegrar debe ser mayor que la masa atómica del átomo residual.

Realizaremos un ejemplo:

Un núcleo de  $^{14}\text{C}_6$  se desintegra según el siguiente esquema



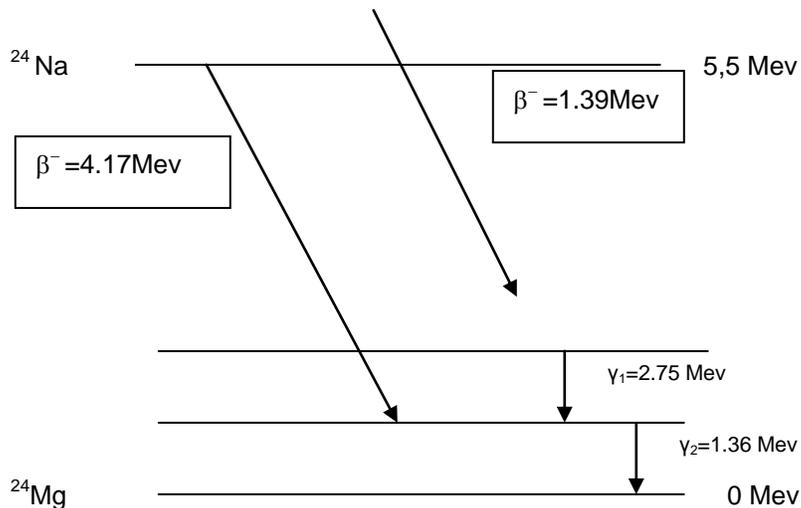
Calcular si la reacción es exotérmica o endotérmica, y cual es la energía de la partícula beta resultante.

$$\left. \begin{array}{l} M_x = 14,007682 \\ M_y = 14,007515 \end{array} \right\} Q_{\beta^-} = 0.1556 \text{ Mev}$$

Vemos que el  $Q > 0$  por lo que la reacción es Exotérmica y se produce en forma espontánea.

Generalmente, la emisión  $\beta^-$  viene acompañada de emisión de fotones gamma. De esta manera habrá un espectro discreto de radiación gamma asociado a un espectro continuo de partículas  $\beta^-$  obteniéndose una curva suma de ambas.

Veremos a continuación la desintegración  $\beta^-$  del sodio.



Resumiendo:

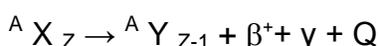
Las partículas  $\beta^-$  presentan un espectro continuo de energías. Presentan frecuentes cambios de dirección en su trayectoria. No tienen un alcance bien definido (en aire para  $E_{\beta^-} = 3 \text{ Mev}$   $L = 13 \text{ mts.}$ )

Como blindaje se pueden utilizar materiales livianos tal como aluminio.

Presentan un grave riesgo de radiación externa ( en piel y ojos).  
 Presentan un grave riesgo de contaminación interna (ingestión e inhalación).

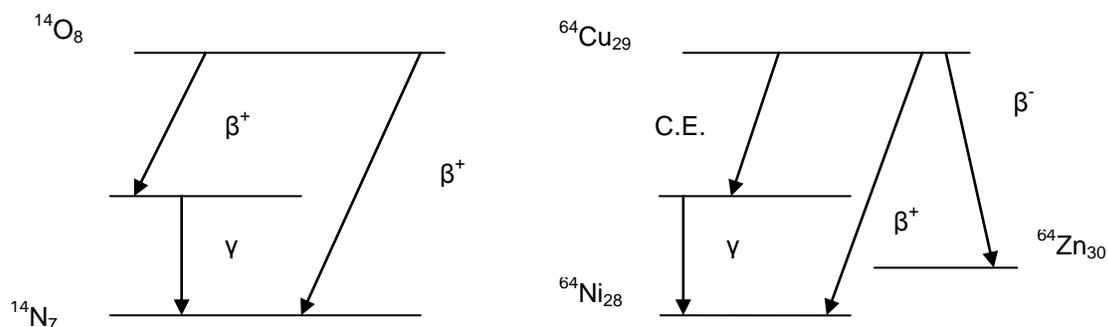
### Desintegración $\beta^+$

Ocurre en núcleos cuya relación N/Z es menor que la franja de estabilidad.  
 El núcleo, mediante esta reacción, disminuye su número atómico en una unidad, manteniendo su masa constante.  
 Dentro del núcleo, un protón se transforma en un neutrón (disminuyendo así su carga eléctrica Z), más un electrón de carga positiva denominada POSITRÓN, el que es emitido fuera del núcleo con cierta energía cinética.



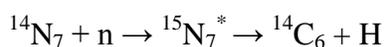
Estas partículas tienen un comportamiento similar a los  $\beta^-$  pero con algunas diferencias que veremos a continuación.

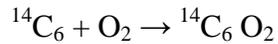
El positrón, al perder su energía cinética por dispersión en el medio, se une a un electrón aniquilándose mutuamente, con una energía  $E = 2 m_e c^2 = 1.02 \text{ Mev}$ . Llamada ENERGÍA DE ANIQUILACIÓN liberada mediante la emisión de dos fotones de 0,51 Mev cada uno que parten en direcciones opuestas.



Para que ocurra  $\beta^+$  la diferencia  $M_x - M_y > 2m_e$

Veremos dos ejemplos de desintegración  $\beta^+$ . Uno de ellos desintegra en  $\beta^+$  y  $\beta^-$ .  
 Aplicación: Cálculo de la vejez de un elemento orgánico. Método del  ${}^{14}\text{C}$  que está en 15,3 desintegraciones por minuto y por gramo.  
 Cuando la vida cesa, el  ${}^{14}\text{C}$  desintegra mediante emisión  $\beta^-$  de baja energía y un período de semidesintegración de 5.668 años. Midiendo el nivel de desintegraciones a tiempo t puede establecerse con cierta precisión cuando murió el organismo.



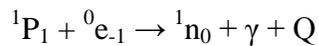


El anhídrido carbónico radiactivo es absorbido por los vegetales y de allí pasa a los animales y al hombre.

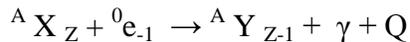
## CAPTURA ELECTRÓNICA ORBITAL

Es un fenómeno que compite con la emisión  $\beta^+$  ya que ocurre con nucleidos con relación N/Z menor a la correspondiente a la franja de estabilidad, y conduce a la formación de un isóbaro de Z menor en una unidad.

Esta transformación ocurre cuando un electrón, generalmente de la capa K o L es capturado por el núcleo produciéndose la siguiente transformación:



O más bien:



Si hacemos un balance de MASA Y ENERGÍA, obtenemos:

$$\Delta M = M_x - M_y \quad \text{para } Q > 0$$

$$M_x > M_y$$

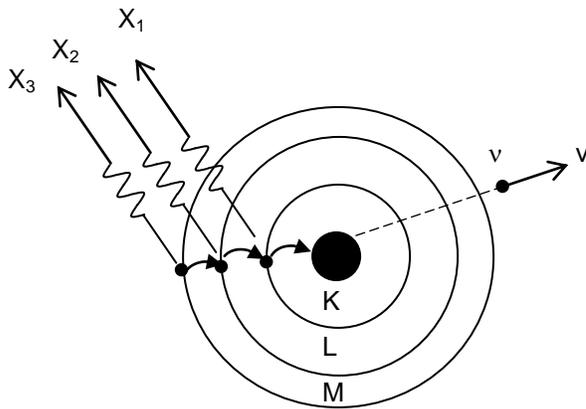
Luego, siempre que  $Q > 0$  es probable que ocurra captura electrónica.

Comparando esta con la emisión  $\beta^+$  podemos decir que:

Si  $\Delta M > 0$  pero  $< 2 m_0$  ocurre captura electrónica.

Si  $\Delta M > 0$  pero  $> 2 m_0$  ocurre simultáneamente captura electrónica y emisión  $\beta^+$

La captura electrónica, también llamada captura K, va siempre acompañada de emisión de rayos x de baja energía, lo que se traduce en un espectro x discreto asociado, que acompaña a la transición.

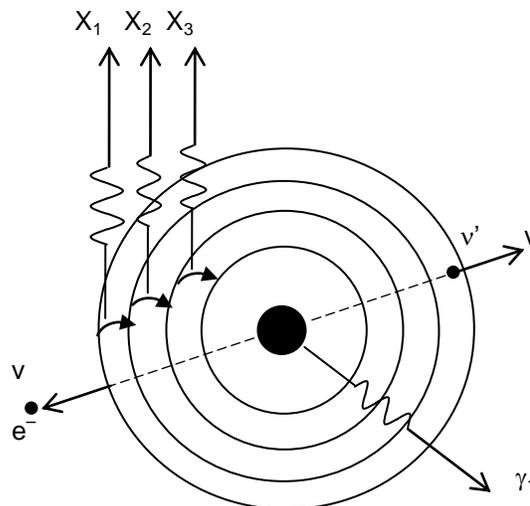


## CONVERSIÓN INTERNA

Ocurre cuando un fotón gamma o x interacciona con un electrón orbital, le cede su energía y lo arranca del átomo con  $E_c = h \nu$  lo cual a su vez genera una sucesión de rayos x característicos.

El electrón resultante queda con una energía igual a la del fotón incidente.

Estos electrones, llamados de conversión interna, son los responsables de la aparición del espectro discreto, superpuesto al clásico espectro continuo de la desintegración  $\beta^+$  y  $\beta^-$



## Desintegración Gamma. Isomería Nuclear

Los núcleos, como los átomos, pueden existir en estados de energía discreta.

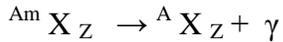
Un núcleo excitado viene representado por un asterisco después de su símbolo, por ejemplo, el  $^{87}\text{Sr}_{38}^*$  hace referencia a un  $^{87}\text{Sr}_{38}$  en estado excitado.

Los núcleos excitados vuelven a su estado fundamental por medio de la emisión de fotones cuyas energías correspondan a la diferencia entre los estados inicial y final de la transición de que se trate. Los fotones emitidos por los núcleos tienen valores de energía de hasta varios Mev y reciben el nombre de rayos gamma.

Para comprender mejor esto debemos diferenciar lo que llamamos estado excitado del átomo y el estado metaestable.

El primero tiene vida corta no medible, es decir que a los efectos prácticos no existe. La desintegración gamma de un estado excitado debe considerarse solo como fenómeno asociado a la desintegración  $\alpha$ ,  $\beta^-$ ,  $\beta^+$ , etc.

El segundo tiene vida medible, es decir existe como tal y la reacción mediante la cual un nucleido metaestable se transforma en el fundamental es la siguiente:



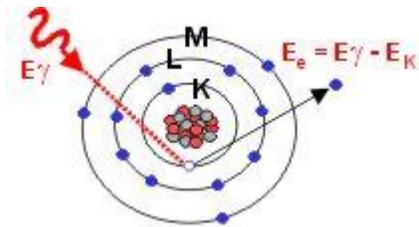
Veremos ahora la interacción de los rayos gamma y X con la materia.

Tres procesos son responsables:

- **Efecto Fotoeléctrico**

El efecto fotoeléctrico consiste en la absorción completa de la energía del fotón incidente por el átomo, de tal forma que dicha energía es completamente transferida a un electrón, que resulta expulsado de su órbita abandonando el átomo (Figura 10), este electrón así expulsado recibe el nombre de fotoelectrón.

Para que se produzca este efecto se requiere que la energía  $E_\gamma$  del fotón incidente sea mayor o igual que la energía  $W$  de enlace del electrón expulsado, siendo el resto de la energía ( $E_e$  en la Figura 10) utilizada en comunicar velocidad a este electrón.



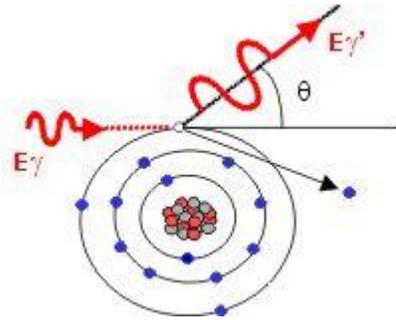
### **Efecto fotoeléctrico**

Cuando el fotoelectrón procede de una capa interna, se produce una reorganización de los electrones de la corteza, de forma que se produce radiación característica o electrones Auger, como se explicó en 8.1.

La probabilidad de que se produzca el efecto fotoeléctrico es directamente proporcional a  $Z^3$  e inversamente proporcional a  $E_\gamma^3$ , por lo que para un material dado se produce una rápida disminución de este efecto al aumentar la energía de los fotones incidentes, salvo en aquellas energías que se corresponden con las energías de enlace de los electrones, en las que se produce un aumento brusco del mismo.

- **Efecto Compton**

En este proceso el fotón incidente interacciona con un electrón, normalmente perteneciente a una capa externa del átomo, al que transfiere una cierta energía arrancándolo del átomo y el resto de energía aparece como un fotón disperso (Figura 11). El ángulo  $\theta$  que forma la trayectoria del fotón disperso con la dirección del fotón incidente puede variar entre  $0^\circ$  y  $180^\circ$  y recibe el nombre de ángulo de dispersión (scattering).



### Interacción Compton

La energía  $E_{\gamma'}$  del fotón disperso está relacionado con la energía  $E_\gamma$  del fotón incidente, mediante la relación:

$$E_{\gamma'} = E_\gamma / [1 + (E_\gamma / 511)(1 - \cos \theta)]$$

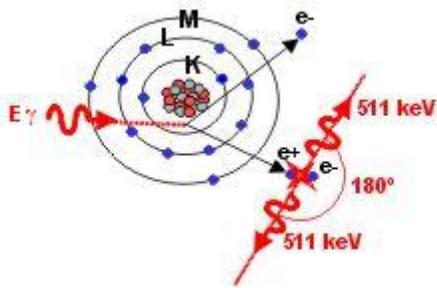
en donde tanto  $E_{\gamma'}$  como  $E_\gamma$  están expresados en keV.

Por otro lado la energía del electrón expulsado  $E_e$  (electrón de rechazo) viene dada por la expresión  $E_e = E_\gamma - E_{\gamma'}$ , despreciando la energía de ligadura del electrón, pues al ser de una capa externa es muy pequeña comparada con  $E_\gamma$ .

La probabilidad de producción del efecto Compton es proporcional al número atómico  $Z$  del material e inversamente proporcional a la energía del fotón incidente

- **Formación De Pares**

Consiste en la desaparición del fotón incidente con la aparición de un electrón y un positrón, como consecuencia de la interacción del fotón con el núcleo atómico (Figura 12). En este proceso se produce la conversión entre energía y masa, con la aparición de un electrón y un positrón.



### Formación de pares

Para que se pueda producir se requiere que el fotón incidente tenga una energía superior a 1,02 MeV, que es el doble de la energía correspondiente a la masa del electrón en reposo. El exceso de energía a dicho valor se utiliza en comunicar energía a las dos partículas.

Posteriormente tanto el electrón como el positrón ceden su energía mediante procesos de interacción de partículas cargadas con materia, quedando el electrón absorbido en el medio, mientras que el positrón finaliza su existencia combinándose con un electrón, produciéndose una reacción de aniquilación y apareciendo dos fotones de energía 0,511 MeV en sentidos opuestos.

## LEYES DE DESINTEGRACIÓN RADIATIVA

Los núcleos se clasifican en primer lugar en estables y en inestables. Hablando de forma no muy precisa, podemos decir que los núcleos estables son aquellos que permanecen invariables en el tiempo. Los núcleos inestables decaen espontáneamente en núcleos más ligeros en una escala de tiempos característica de la especie nuclear particular. Esta escala de tiempos puede expresarse en términos de la vida media de las especies, definida como el intervalo de tiempo durante el cual la mitad de la muestra inicial decae. Si la vida media para el decaimiento es mayor que alguna (indefinida) pequeña fracción de un segundo, el proceso de decaimiento se llama radiactividad. Las vidas medias de diferentes especies varían desde mucho menos que un segundo a muchos miles de millones de años.

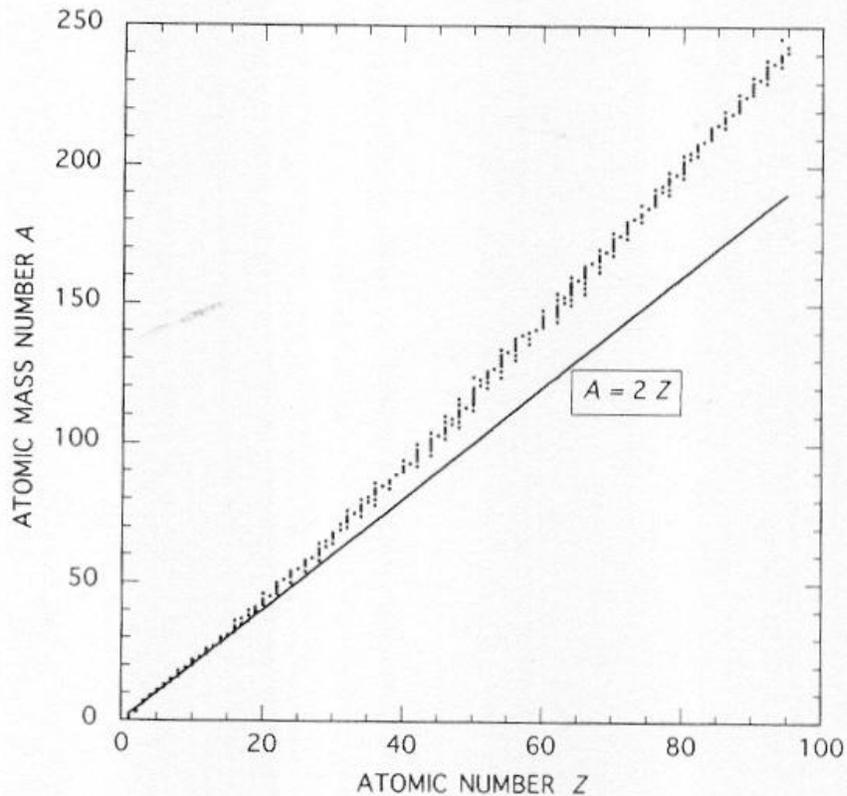
El concepto de “estabilidad” no es un concepto absoluto. El nucleido “estable” más pesado es el bismuto  $^{209}\text{Bi}$ , con  $Z = 83$  y  $A = 209$ . Hay alguna evidencia, sin embargo, de que decae con una vida media del orden de  $10^{18}$  años. (Esto significa “estable” para la mayor parte de los propósitos, ya que la edad del universo es sólo del orden de  $10^{10}$  años). Debería también notarse que algunas teorías corrientes sugieren que el mismo protón no es estable, pero si el protón decae, lo hace a una velocidad extraordinariamente lenta (con una vida media de más de  $10^{31}$  años). Desde luego, tales decaimientos lentos no tienen ninguna relevancia en los procesos de radiactividad en los que nosotros estamos interesados.

La mayor parte de los nucleidos más ligeros que el  $^{209}\text{Bi}$  y que se encuentran en la naturaleza, son estables. Sin embargo, hay excepciones, tales como el potasio 40 ( $^{40}\text{K}$ ), y el rubidio 87 ( $^{87}\text{Rb}$ ), que son ambos residuos de larga vida de procesos de núcleo síntesis

estelar, al igual que el carbono 14 ( $^{14}\text{C}$ ), que tiene una vida media relativamente corta ( $T = 5730$  años), pero se produce constantemente en la atmósfera debido a los rayos cósmicos.

Por encima del  $^{209}\text{Bi}$ , y continuando hasta el  $^{238}\text{U}$  ( $Z = 92$ ,  $A = 238$ ), los núcleos que se encuentran en la naturaleza no son estables. La razón de que algunos de ellos se encuentren todavía en la naturaleza es que o bien tienen vidas medias muy largas, como en el caso del  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ , y  $^{238}\text{U}$ , o que son descendientes de estos núcleos. Por encima de  $Z = 92$ , un considerable número de núcleos se han podido formar artificialmente, y las propiedades de algunos de ellos están bien establecidas. Según uno sube más arriba, las vidas medias de los núcleos tienden a decrecer. El nucleido más pesado firmemente identificado, hasta 1993, es el  $Z = 109$ ,  $A = 266$ , con una vida media del orden de milisegundos. Ha habido también noticias de la producción e identificación de nucleidos de número atómico más alto, hasta  $Z = 112$ .

La mayor parte de la masa del Universo se concentra en hidrógeno (principalmente  $^1\text{H}$ ), helio (principalmente  $^4\text{He}$ ), y núcleos con valores par de  $Z$ , y con  $A = 2Z$ , comenzando con el carbono ( $Z = 6$ ), y continuando hasta el calcio ( $Z = 20$ ), esto es,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ , ...  $^{40}\text{Ca}$ . Para números atómicos más altos, los isótopos estables tienen  $A > 2Z$ , es decir, más neutrones que protones en el núcleo. Para cada número másico  $A$ , hasta  $A = 209$  (salvo para los valores  $A = 5$  y  $A = 8$ , para los que no existen núcleos estables), hay uno o más núcleos estables y un conjunto de núcleos que son inestables en emisión de partículas  $\beta$ . Los núcleos estables se agrupan en una trayectoria, que sigue la línea  $A = 2Z$  hasta más o menos  $A = 40$ , y continúa creciendo hasta  $Z = 83$ ,  $A = 209$ . Para valores más altos de  $A$ , todos los núcleos son inestables por decaimiento alfa o beta, pero algunos de los núcleos que se desintegran mediante desintegración alfa tienen vidas medias altas. La mayor parte de los isótopos radiactivos naturales se encuentran entre  $Z = 82$  y  $Z = 92$ , siendo la principal excepción el caso del  $^{40}\text{K}$ .



La ley de la desintegración radiactiva predice el decrecimiento con el tiempo del número de núcleos de una sustancia radiactiva dada, que van quedando sin desintegrar.

El número de átomos de un elemento radiactivo que se desintegra por unidad de tiempo, es proporcional al número de los que todavía no se han desintegrado.

-  $dN = N \lambda dt$        $N$  = número de átomos presentes en cada instante.

$\lambda$  = constante de desintegración radiactiva.

-  $dN/dt = \lambda N = A$        $A$  = Actividad

Se denomina Actividad de una muestra activa, al número de átomos que desintegran en la unidad de tiempo. Es la velocidad de desintegración de una fuente activa al tiempo  $t$ .

Las unidades usuales de actividad son:

CURIE: unidad de radiactividad definida como la cantidad de cualquier nucleido radiactivo en el cual el número de desintegraciones por segundo es  $3,7 \times 10^{10}$  (Ci)

BECQUEREL: unidad moderna de radiactividad equivalente a una desintegración radiactiva. (Bq)

1 Bq = 1 desintegración por segundo.

Integrando la ecuación anterior, obtenemos

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

N número de núcleos sin desintegrar

$N_0$  número de núcleos que hay inicialmente

t tiempo

$\lambda$  constante de desintegración

$\lambda$  tiene una dimensión de  $t^{-1}$  y mide la probabilidad de que un átomo determinado desintegre en la unidad de tiempo.

Tiene un valor diferente para cada radioisótopo y en el caso del  $\text{Ra}^{226}$  mide 0,00044 años.

La ecuación vista, representa una ley de tipo exponencial y es una muestra de que este fenómeno es de naturaleza estadística.

Reemplazando en la ecuación a N por N/2 y t por T, se obtiene

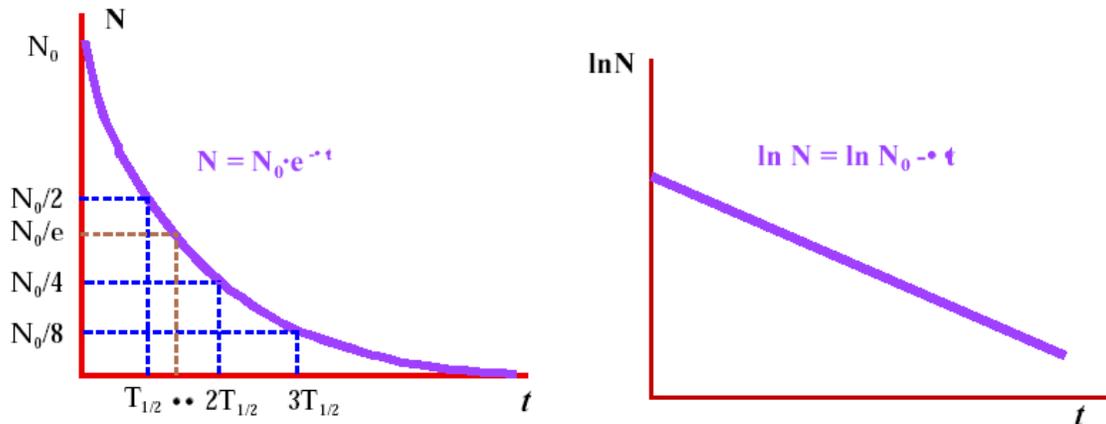
$$N = N_0 \cdot e^{-0,693t/T}$$

T: Período de Semidesintegración Radiactiva: Es el tiempo necesario para que un número estadísticamente significativo de átomos se reduzca a la mitad de su valor inicial.

Es posible encontrar la probabilidad de "supervivencia" durante cierto intervalo de tiempo de un núcleo atómico dado. Dicha probabilidad es del 50 % para el tiempo de vida media. Para un intervalo de tiempo doble al de vida media (2T), la probabilidad es de sólo del 25 % (la mitad del 50 %), o del 12,5 % (la mitad de 25 %) si el intervalo es triple (3T), y así sucesivamente.

Sin embargo, no se puede predecir el tiempo de desintegración de un núcleo atómico. Por ejemplo, aun cuando la probabilidad de desintegración en el segundo siguiente sea del

99 %, es con todo posible (aunque improbable) que el núcleo se desintegre al cabo de millones de años.



*Vida media,  $\tau$ .*

Valor medio de la vida de un átomo o tiempo que por término medio tarda un núcleo en desintegrarse

$$\tau = 1/\lambda$$

Vinculando este concepto con el de PERIODO se tiene:

$$T = 0.693/\lambda$$

$$\tau = 1.44 T$$

Si  $t = \tau$  reemplazando este valor en la ecuación se obtiene:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = N_0 e^{-0.693/T \cdot T/0.693} = N_0 e^{-1}$$

$$N = N_0 / e$$

Deducimos de aquí que Vida media es el tiempo que debe transcurrir para que un número determinado de átomos  $N_0$  se reduzca a la ésima parte de su valor.

Si en la ecuación multiplicamos por  $\lambda$  obtenemos:

$$\lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad A = A_0 e^{-\lambda t}$$

$$A = A_0 e^{-0.693 t/T}$$

$$A = N 0.693/T$$

Expresión que permite calcular la actividad de una fuente a tiempo t.