

INESTABILIDAD NUCLEAR Y DECAIMIENTO RADIATIVO

**DRA. ANA M. REY
PROF. ADJUNTO DE RADIOQUÍMICA**

MARZO 2004

La radiactividad es un fenómeno *espontáneo* de transformación de un *nucleido* en otro con emisión de energía (*radiación*).

Pero, ¿qué es un nucleido? Un *nucleido* es un tipo de átomo cuyo núcleo tiene un número determinado de protones y de neutrones y un estado energético definido. El número de elementos conocidos hasta el momento es cercano a los 120. Los nucleidos, en cambio, son muchos más, alrededor de 2000. Esto significa que átomos del mismo elemento pueden corresponder a nucleidos diferentes. El átomo está básicamente formado por protones, neutrones y electrones. En un átomo neutro el número de electrones es igual al de protones (Z). Los electrones determinan las propiedades químicas de una sustancia. Todos los átomos con igual Z presentan iguales propiedades químicas y corresponden, por lo tanto, al mismo elemento. El elemento es, por lo tanto, la unidad de la Química. Sin embargo, a partir del descubrimiento de la radiactividad (Becquerel, 1896) se sucedieron experiencias que demostraron que átomos del mismo elemento podían presentar propiedades nucleares diferentes, tan diferentes que algunos de ellos eran estables y otros radiactivos. El elemento no puede, entonces, ser la unidad en radioquímica. Esa unidad es el nucleido. Todos los átomos de un mismo nucleido poseen iguales propiedades radioquímicas.

Debido a la gran cantidad de nucleidos existentes es necesario ordenarlos y clasificarlos a fin de sistematizar el estudio de sus propiedades. Los nucleidos con igual cantidad de protones (Z) pero diferente masa (A) se denominan *isótopos*. El carbono, por ejemplo, presenta 12 isótopos con A desde 9 hasta 20. De ellos solamente el ^{12}C y el ^{13}C son estables. La diferente masa de los isótopos se debe a que poseen distinto número de neutrones (N). *Isótonos* son aquellos nucleidos que tienen igual cantidad de neutrones pero distinto Z y distinto A. Corresponden, pues, a distintos elementos. ^{134}Cs , ^{133}Xe y ^{132}I todos poseen 79 neutrones. Los nucleidos con el mismo A pero distinta combinación de Z y N se denominan *isóbaros*, por ejemplo ^{82}Y , ^{82}Sr y ^{82}Rb . *Isómeros* son aquellos nucleidos con igual Z e igual A pero cuyos núcleos se encuentran en distintos estados energéticos debido a un distinto ordenamiento de los nucleones. El estado de menor energía se denomina estado fundamental. Los demás, de mayor energía, estados excitados.

Radionucleidos son aquellos nucleidos inestables que se desintegran, emitiendo al hacerlo partículas y/o radiación electromagnética. Sólo existen 275 nucleidos estables. Todos los demás son radiactivos.

La palabra desintegración o decaimiento no significa en este caso ni desaparición ni destrucción. Implica pérdida de identidad, transformación de un nucleido en otro diferente. Así, la idea sostenida desde la época de los antiguos griegos de la inmutabilidad del átomo (átomo significa indivisible) deja de ser válida. Es necesario replantearse las teorías sobre la estructura de la materia. Comienza el largo camino de la búsqueda de lo más simple (Figura I).

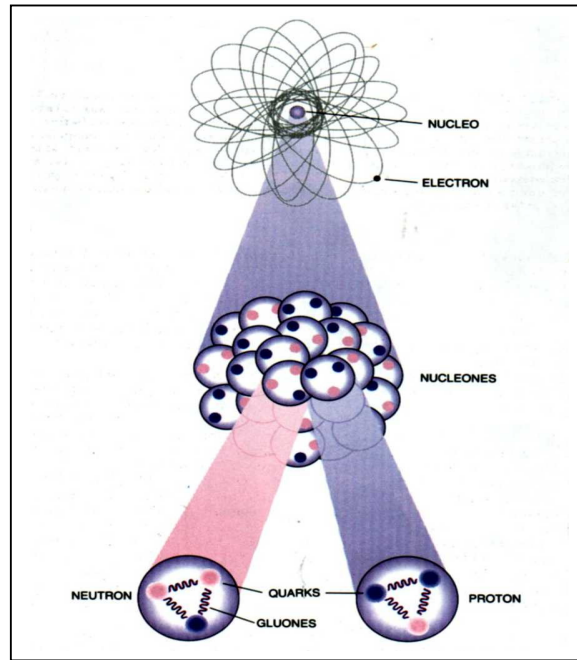


FIGURA I

La transformación de un nucleido radiactivo va acompañada por la emisión de radiación, energía que se propaga por el espacio. Experimentos llevados a cabo introduciendo una muestra de material radiactivo en un orificio practicado en un bloque de metal y sometiendo la radiación emitida a la acción de un campo magnético permitió distinguir 3 tipos de radiación: radiación α , constituida por partículas con carga +2 y masa 4 (núcleos de ${}^4\text{He}$), radiación β , formada por partículas con carga -1 y masa igual a la del electrón (electrones con elevada energía cinética) y radiación γ , radiación electromagnética de alta energía. La figura II muestra esquemáticamente dichos experimentos.

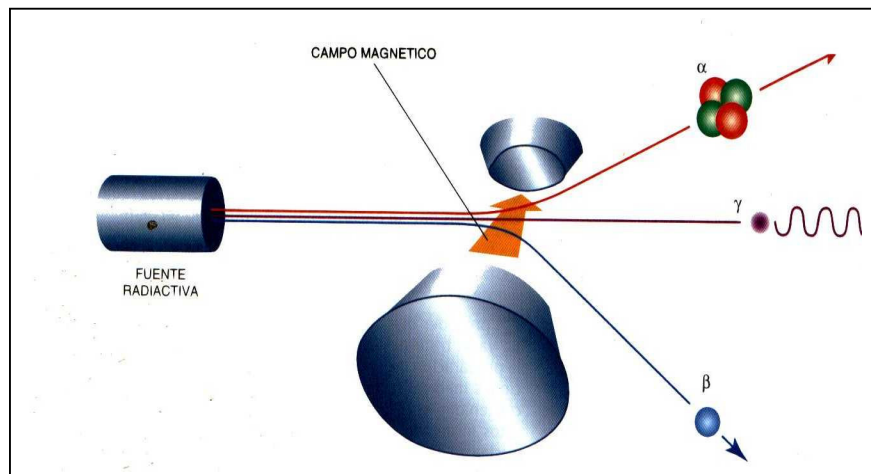


FIGURA II

Más tarde se descubrió que existía un cuarto tipo de radiación, la radiación β^+ , formada por partículas de igual masa que el electrón y carga de igual magnitud pero de signo positivo, el positrón. Este tipo de radiación no es emitida por ningún radionucleido presente en la naturaleza.

El decaimiento radiactivo es un fenómeno espontáneo, se produce sin intervención externa. Como todos los procesos espontáneos ocurre porque el sistema tiene un exceso de energía potencial. Dicha energía en exceso se libera como energía cinética de las partículas emitidas y/o como radiación electromagnética.

¿De dónde surge esta energía?. Se genera a partir de una fracción de la masa del sistema que desaparece. Si bien esto parece contradecir el principio de conservación de la masa en realidad no es así, ya que de acuerdo con la Teoría de la Relatividad la masa es una forma altamente concentrada de energía. Así lo expresa la conocida ecuación de Einstein $E = mc^2$. Masa y energía son magnitudes interconvertibles. Siempre que un proceso libera energía el sistema pierde algo de masa y cuando absorbe energía se gana masa. La cantidad de masa ganada o perdida en condiciones ordinarias (Por ejemplo en las reacciones químicas) es tan escasa que nunca se había apreciado. Con el estudio de la radiactividad, fenómeno en que los cambios de energía son mucho mayores, se pudo medir esta equivalencia masa-energía. Así la ley de la conservación de la masa quedó superada y la ley de conservación de la energía se extendió y ganó en precisión incluyendo a ambas. La pérdida de masa del sistema nos permite calcular la energía que se liberará en cada proceso de decaimiento radiactivo ($E \text{ (Mev)} = \Delta m \text{ (umas)} \times 931.5$).

¿Cuál es el origen de la radiactividad? El origen de la inestabilidad de algunos nucleidos se encuentra en la estructura de su núcleo. El núcleo atómico, cuya existencia fue postulada por Rutherford recién en 1911, está constituido por protones y neutrones (colectivamente denominados nucleones) distribuidos en niveles de energía dentro del núcleo (de acuerdo con la teoría de capas). Es muy pequeño en relación al átomo, ya que el radio nuclear es de aproximadamente 10^{-13} cm mientras que el radio atómico alcanza los 10^{-8} cm. Estos valores del radio nuclear se calculan en forma aproximada, a través de experimentos de bombardeo, ya que el núcleo no es realmente una esfera de radio definido sino una zona del espacio donde existe la máxima probabilidad de encontrar a los nucleones. Así lo establecen las leyes de la mecánica cuántica y en particular el principio de incertidumbre que indica que no es posible conocer la posición de todos los nucleones en todo momento.

Para todos los núcleos se cumple la ecuación general:

$$r = r_0 (A)^{1/3} \text{ (ecuación 1)}$$

donde r_0 es una constante independiente de A . Su magnitud varía entre 1.1 a 1.6×10^{-13} cm, dependiendo del método empleado en la medida del radio nuclear. De la ecuación 1 podemos extraer varias conclusiones. La primera es que la densidad de todos los núcleos es aproximadamente constante. Si consideramos al núcleo como una esfera (en forma aproximada), su volumen será proporcional al radio elevado al cubo, o sea proporcional al número de nucleones ($V \propto A$). La masa de un núcleo también es aproximadamente proporcional al número de nucleones (ya que la masa de protón y neutrón son casi iguales) y por lo tanto la densidad ($D = m/V$) es una constante independiente de A . Este hecho indica que los nucleones se encuentran densamente empacados en el núcleo ocupando un volumen igual a la suma de sus volúmenes individuales. La densidad nuclear calculada es de $1,2 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$. Si comparamos este valor con la densidad del elemento más denso conocido, el osmio ($22,6 \text{ g/cm}^3$), observamos que los núcleos son 10^{13} veces más densos que los átomos de los que forman parte, debido a que los electrones representan una mínima porción de la masa distribuida en la mayor parte del volumen atómico. La alta densidad nuclear tiene como consecuencia que en todos los núcleos con $Z > 1$ exista una elevada repulsión electrostática entre los protones, ya que el núcleo

concentra una elevada carga positiva en un muy pequeño espacio. Esta repulsión constituye un factor de inestabilidad intrínseca del núcleo atómico. Por lo tanto, para que el mismo pueda existir y ser estable es necesario que exista una intensa fuerza atractiva entre los nucleones que contrarreste dicha repulsión. Esta fuerza se denomina *fuerza nuclear*.

Se trata de una fuerza atractiva, sumamente intensa (su magnitud es 100 veces superior a la de las fuerzas electrostáticas y 10^{35} veces la de las gravitacionales). Es independiente de la carga eléctrica, o sea que la fuerza protón-protón, protón-neutrón y neutrón-neutrón son iguales. A diferencia de la repulsión electrostática que disminuye proporcionalmente al cuadrado de la distancia entre las partículas pero sin llegar nunca a anularse completamente, la fuerza nuclear es aproximadamente constante hasta una distancia del orden de 10^{-13} cm, cayendo bruscamente a 0 a distancias mayores. Este corto rango de acción determina que el núcleo sea tan pequeño con relación al radio atómico.

La fuerza nuclear es una de las 4 interacciones fundamentales de la naturaleza (gravitacionales, electromagnéticas, fuertes y débiles) y actualmente se acepta que resulta del intercambio de las partículas virtuales que se han denominado gluones (glue, significa pegamento en inglés), por actuar éstas como "cemento" de los quarks, que componen los nucleones. Las partículas virtuales no existen en todo momento dentro del núcleo sino que aparecen y desaparecen en períodos cortos sin violar el principio de conservación de la energía, ya que cumplen con el principio de incertidumbre de Heisenberg. Como vemos, el núcleo es mucho más complejo que un simple aglomerado de protones y neutrones ya que éstos, a su vez, están formados por otras partículas, los quarks. Los quarks son partículas subatómicas, de carga fraccionaria (+2/3 y -1/3) y que se combinan para formar distintos tipos de partículas mayores. Existen 6 clases de quarks a los que se denominó arriba (up), abajo (down), extraño (strange), encanto (charm), cima (top, antes truth) y base (bottom, antes beauty). Los quarks nunca se han observado aislados, sino solamente formando parte de las partículas compuestas denominadas hadrones. Los quarks se mantienen unidos a través de la interacción fuerte. Existen 2 clases de hadrones: los bariones formados por la unión de 3 quarks y los mesones, integrados por un quark y un antiquark. Los nucleones son bariones, el protón está integrado por 2 quarks up y 1 quark down, es decir que su estructura es (u,u,d) mientras que el neutrón consta de 2 quarks down y 1 quark up, (u,d,d).

Cuando la fuerza nuclear supera la repulsión electrostática el núcleo es estable. Este balance entre atracción y repulsión depende fundamentalmente de la cantidad de protones y de neutrones que posea el núcleo.

La Figura III muestra una gráfica Z versus N para todos los nucleidos estables. No se trata de una línea sino de una banda denominada "cinturón de estabilidad", ya que muchos elementos poseen varios isótopos estables. El ${}^6\text{C}$, por ejemplo, tiene 2, el ${}^8\text{O}$ tiene 3 y el ${}^{50}\text{Sn}$ tiene 10. En ella observamos que para $Z < 20$ dichos nucleidos presentan aproximadamente igual número de neutrones que de protones. Este es el caso del ${}^4\text{He}$, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{13}\text{C}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{18}\text{O}$, ${}^{40}\text{Ca}$ (N/Z aprox. 1).

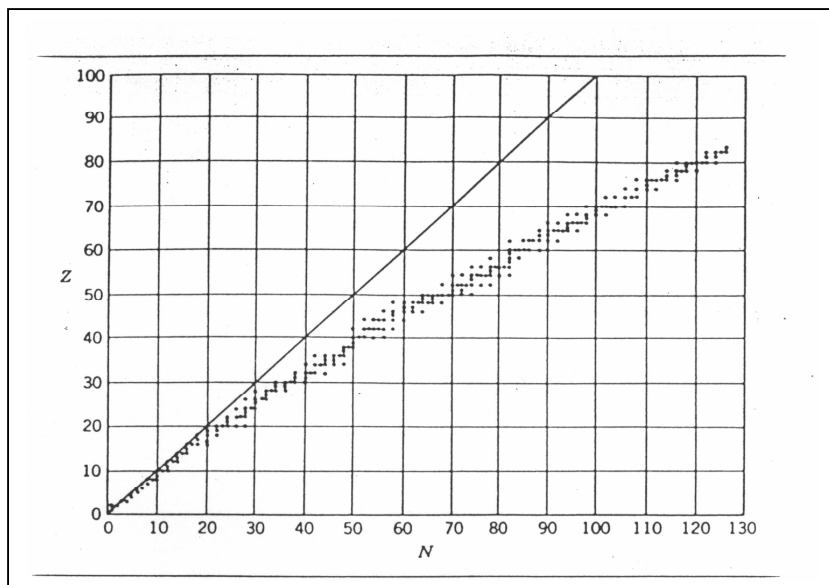


FIGURA III

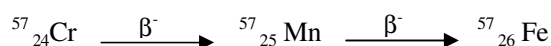
A medida que la carga nuclear crece aumenta la repulsión electrostática. La presencia de un mayor número de neutrones, que aportan exclusivamente atracción y contribuyen a disminuir la repulsión separando a los protones, parece ser la forma de mantener la estabilidad del núcleo. La relación óptima neutrones/protones crece hasta valores cercanos a 1.5. Ejemplo de esto lo encontramos en nucleidos de Z elevado: ^{127}I ($N/Z = 1.4$), ^{208}Pb ($N/Z = 1.54$).

Sin embargo, a medida que aumenta la cantidad de nucleones aumenta también el tamaño del núcleo y debido al corto rango de las fuerzas nucleares, llega un momento en que resulta imposible alcanzar el balance atracción-repulsión por agregado de más neutrones. Para $Z > 83$ todos los nucleidos son radiactivos.

Los núcleos que caen fuera del cinturón de estabilidad son radiactivos. La relación N/Z de los mismos determina que tipo de transformación deberá experimentar para acercarse a la estabilidad. Si un núcleo es excesivamente rico en neutrones ($N/Z >$ que el valor de la estabilidad) un neutrón se transformará en protón con emisión de un electrón (decaimiento β^-). Si tiene, en cambio, mas cantidad de protones que sus isótopos estables existen 2 posibilidades: que un protón se transforme en un neutrón liberando concomitadamente un positrón (decaimiento β^+) o que un protón del núcleo capture un electrón periférico dando lugar a la aparición de un neutrón adicional (captura electrónica). Cuando A es demasiado alto entonces se produce la emisión conjunta de 2 protones y 2 neutrones bajo la forma de un núcleo de helio (emisión α). Puede ocurrir, también, que un núcleo no tenga exceso de neutrones o protones sino que simplemente tenga exceso de energía por encontrarse sus nucleones en estados excitados. El exceso de energía se liberará en forma de radiación electromagnética, y el proceso se denomina emisión γ o transición isomérica. Existen, además, otros modos de decaimiento menos frecuentes como fisión espontánea, emisión de protones e incluso emisión de fragmentos pesados como ^{14}C , ^{22}Ne o ^{24}Mg .

Un nucleido no tienen porque alcanzar la estabilidad en un solo paso, sino que a veces existen cadenas de decaimiento hasta llegar a uno estable.

Ejemplo:



Además, muchas veces existe más de un modo de decaimiento posible, ya que la regla de la relación de N/Z es sólo una aproximación que no se cumple estrictamente en todos los casos. El ^{74}As , por ejemplo, decae simultáneamente por emisión β^- , β^+ y captura electrónica.

Como vemos, los núcleos radiactivos a pesar de ser inestables no tienden a separarse en sus partículas constitutivas, sino a transformarse en otro núcleo con una relación N/Z más favorable. Esto se debe a que, aún para los radionucleidos, la existencia del núcleo como tal es más favorable desde el punto de vista energético que la separación en los nucleidos que lo constituyen. La formación de un núcleo por unión de los nucleones debe ser, por tanto, un proceso energéticamente favorable. Es esperable, entonces, que la suma de las masa del átomo sea siempre menor que la calculada a partir de la suma de las partículas que lo constituyen y esto es lo que ocurre en la realidad. Por ejemplo, para el ^4He la masa atómica es de 4.002603 umas, mientras que el resultado de multiplicar por 2 la suma de las masas del protón, del neutrón y del electrón es igual a 4.032982 umas. Esa diferencia de masa, en este caso 0.030379 umas, se denomina defecto másico (Δm) y se atribuye principalmente al núcleo (por ser quien concentra casi toda la masa del átomo). Su magnitud es equivalente a la energía liberada cuando los nucleones se unieron para formarlo. Esta energía se denomina energía de ligadura y corresponde también a la cantidad de energía que deberíamos suministrar para destruir el núcleo separando los nucleones.

Como consecuencia de lo anterior la energía de ligadura por nucleón (E_l/A) de un núcleo determinado es una medida de su estabilidad. Si se grafica Energía de ligadura por nucleón versus número de nucleones (E_l/A vs. A) para todos los nucleidos con $A > 11$ (Figura IV) se observa que la misma varía entre 7.4 y 8.8 MeV. con un máximo para A aproximadamente 60. Ese máximo coincide con la zona en que se encuentran elementos como el Fe, Co y Ni, muy abundantes en la corteza terrestre debido a su gran estabilidad. A ambos lados del máximo la E_l/A disminuye, haciéndolo más lentamente hacia valores de A mayores. Esto trae como consecuencia que reacciones mediante las cuales se divide un núcleo pesado (U o Pu) para obtener 2 núcleos menores (fisión nuclear) provoquen una importante liberación de energía.

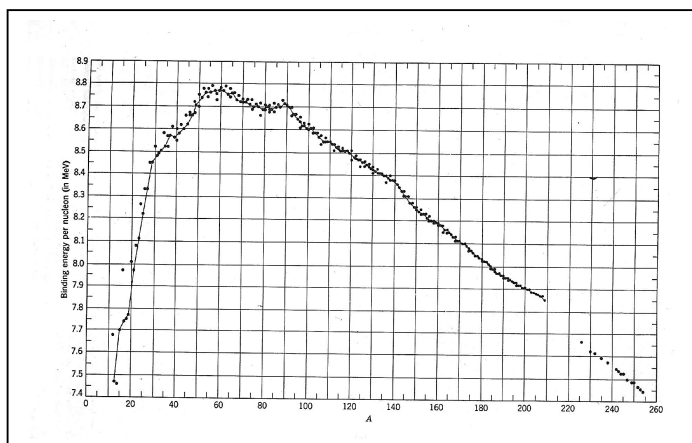


FIGURA IV

Para los nucleidos con $A < 11$, en cambio (Figura V) la E_l/A aumenta al aumentar el número de nucleones. Por este motivo la fusión nuclear, proceso por el cual 2 núcleos pequeños, generalmente isótopos del hidrógeno o del helio, se unen para formar uno mayor sea, al igual que la fisión un proceso altamente exoenergético. En la gráfica se destacan, también, los altos valores de E_l/A de los nucleidos con Z y N par, por

ejemplo ${}^4_2\text{He}$, ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{16}_8\text{O}$, en comparación con sus vecinos, los que indican la existencia, al igual que para los electrones, de “números mágicos” de nucleones que favorecen la estabilidad del núcleo, y dan un argumento a favor al modelo de capas de la estructura nuclear.

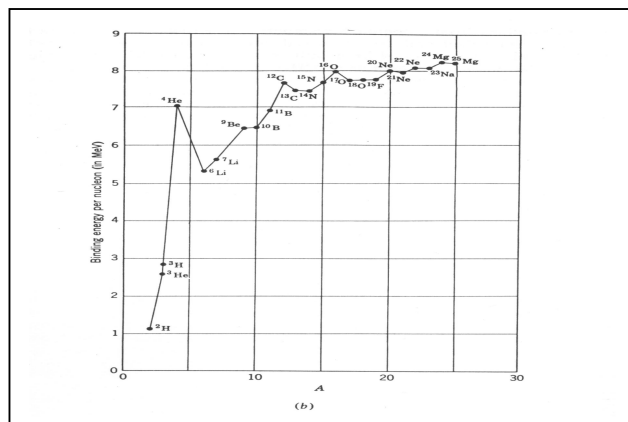
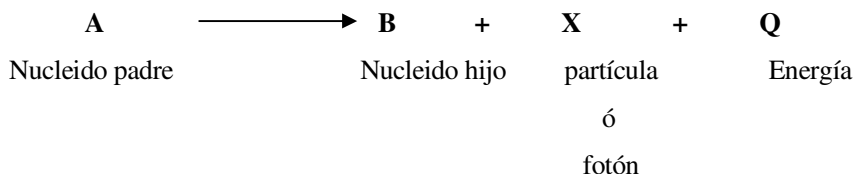


FIGURA V

El decaimiento radiactivo puede describirse en forma general mediante la ecuación:



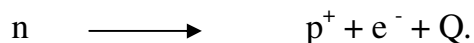
La energía liberada (Q) puede calcularse a partir de la diferencia de masa entre reactivos y productos.

$$Q = (m_A - m_B - m_X) c^2$$

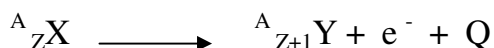
Esta energía se libera como energía cinética de las partículas emitidas o como radiación electromagnética (energía de excitación del núcleo hijo). La radiación electromagnética producida por la desexcitación del núcleo hijo puede ser liberada simultáneamente con el mismo (si la desexcitación es muy rápida) o más tardíamente (cuando el estado excitado tiene una duración mayor).

Como ya dijimos, los modos de decaimiento más frecuentes son : decaimiento β^- , decaimiento β^+ , captura electrónica, emisión α y emisión γ .

El decaimiento β^- se produce cuando el radionucleido tiene más neutrones que sus isótopos estables y consiste en la transformación de un neutrón en protón, con la consiguiente liberación de un electrón y de energía. El electrón no puede formar parte del núcleo y por lo tanto es eyectado del mismo.



En el proceso el número total de nucleones (A) se mantiene constante, mientras que el número atómico (Z) aumenta en una unidad.



Ejemplo:



Para calcular la energía Q producida por una reacción nuclear, debe conocerse la variación de masa que se produce en la misma y emplear la equivalencia masa-energía de Einstein.

$$\Delta m = m_{\text{reactivos}} - m_{\text{productos}} \quad \text{y} \quad Q = \Delta m \times 931,5 \text{ (MeV)}$$

Obsérvese que Q siempre será del mismo signo que Δm , por lo que para saber si una determinada reacción nuclear es termodinámicamente posible o no basta estudiar el signo de Δm . Es usual en Química Nuclear tomar la convención inversa a la empleada en Termodinámica, es decir Estado inicial-Estado final. Por supuesto que el criterio de espontaneidad no cambia y los procesos nucleares espontáneos son aquellos que liberan energía. Cierta energía liberada debe producirse a partir de cierta masa "perdida" al pasar de reactivos a productos, es decir que para que un proceso sea espontáneo debe cumplirse que $m_{\text{reactivos}} > m_{\text{productos}}$, lo cual en nuestra convención corresponde a $\Delta m > 0$ y $Q > 0$. Un proceso con Δm o Q negativos no será posible termodinámicamente.

Para calcular el Δm de un tipo determinado de decaimiento debe recordarse que el proceso es siempre nuclear (sólo en el caso de la captura electrónica involucra un electrón periférico) pero las masas de los nucleidos que están tabuladas son atómicas por lo que incluyen también las masas de los electrones y debe estudiarse en cada tipo de emisión cómo realizar la corrección correspondiente.

En la emisión β^{-} , si se emplearan las masas de los núcleos X e Y, el cálculo de Δm sería:

$$\Delta m = m_{\text{núcleo X}} - (m_{\text{núcleo Y}} + m_{e^{-}}).$$

Pero como se dijo, se utilizan las masas tabuladas, que corresponden a las masas atómicas, que en el caso del nucleido X incluye Z electrones y en el del nucleido Y, (Z+1) electrones. Por lo tanto en la masa atómica de Y, ya se está considerando 1 electrón más que en la masa de X y en el cálculo no debe "tenerse en cuenta" la masa del electrón emitido. Entonces empleando masas atómicas el Δm para el decaimiento β^{-} se calcula:

$$\Delta m = m_{\text{atómica X}} - m_{\text{atómica Y}}.$$

A pesar que el cálculo anterior dará como resultado un único valor de energía para cada par nucleido padre – nucleido hijo, la partícula β^{-} no se emite con una energía única o con un grupo de energías discretas (correspondientes a la transición a estados excitados), como sería de esperar, sino que se emite con un espectro continuo de energía que va desde 0 hasta una energía máxima igual al valor calculado. (Figura VI).

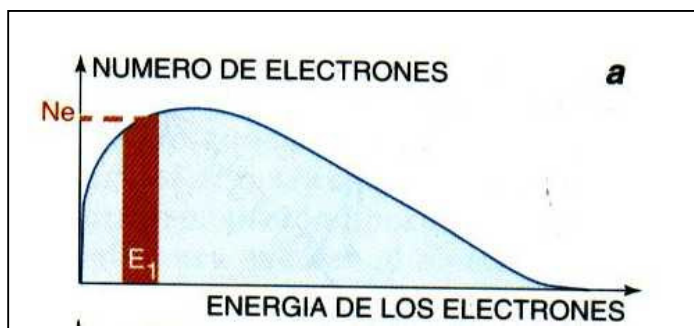


FIGURA VI

Para que se cumpla el principio de conservación de la energía es necesario que se emita otra partícula que se lleve una parte de la energía. Esta partícula es neutra y de masa muy pequeña, lo cual dificulta su detección y se denomina antineutrino. El antineutrino tiene un espectro de energía complementario con el de la partícula β^- a la que acompaña, de modo que la suma de las energías emitidas sea siempre igual a la $E_{\text{máx.}}$ del emisor (Figura VII).

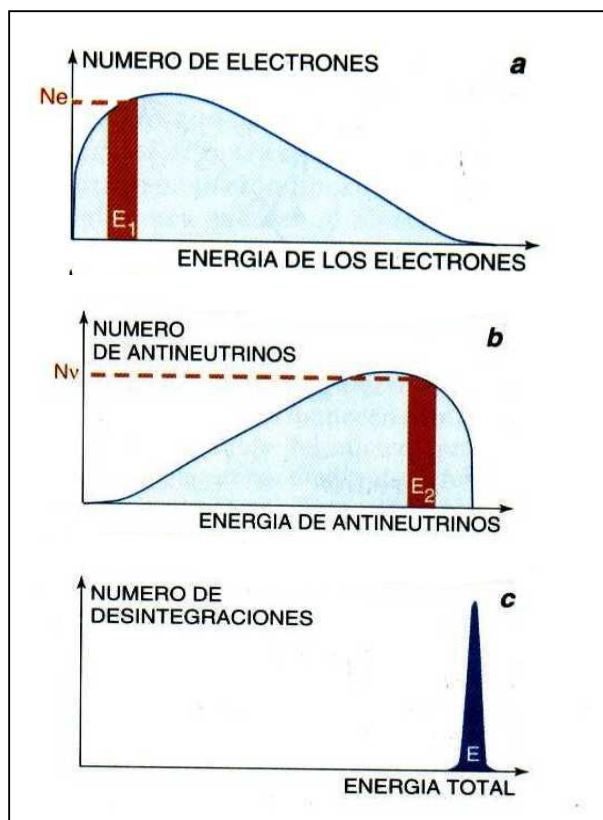


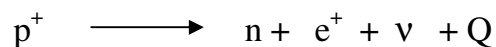
FIGURA VII

El valor máximo de la curva de Energía versus Número de electrones corresponde a la energía más probable de energía y es aproximadamente un tercio de $E_{\text{máx.}}$. La ecuación general del decaimiento β^- es, entonces, como sigue:

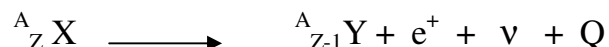


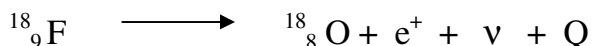
En muchos casos el nucleido padre no decae directamente al estado fundamental sino a un estado excitado del nucleido hijo. El exceso de energía se libera casi instantáneamente en forma de un fotón gama. Existen, por lo tanto, emisores β puros: ${}^{14}\text{C}$, ${}^{32}\text{P}$, ${}^{90}\text{Sr}$, ${}^{90}\text{Y}$ y otros que son emisores β , gama: ${}^{131}\text{I}$, ${}^{99}\text{Mo}$, ${}^{38}\text{Cl}$.

El decaimiento β^+ ocurre cuando el radionucleido tiene menos neutrones que sus isótopos estables. En este caso un protón nuclear se convierte en un neutrón con emisión de un positrón y un neutrino.



Por lo tanto, A permanece constante y Z disminuye en una unidad.



Ejemplo:

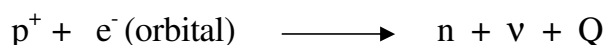
Debido a la disminución de Z es necesario que se elimine un electrón de los orbitales electrónicos del nucleido hijo para mantener la neutralidad. Es así que la masa del nucleido hijo será por lo menos 2 x masa del electrón menor que la del padre y en consecuencia la diferencia energética entre los estados inicial y final debe ser al menos de 1.02 MeV. El Δm se calcula de la siguiente manera:

$$\Delta m = m \text{ atómica padre} - (m \text{ atómica hijo} + 2 m e^-)$$

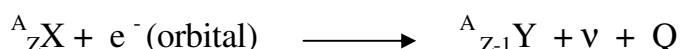
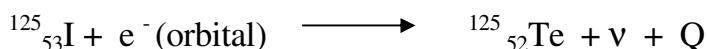
El espectro energético del positrón es en todo idéntico al del β^- , o sea, un espectro continuo entre 0 y E máxima. Los positrones, tras ser emitidos, pierden su energía por colisiones atravesando una corta distancia en el medio. Una vez cercanos al reposo, se combinan con su antipartícula, el electrón, produciéndose el fenómeno de aniquilación con emisión de 2 rayos gama de 0.51 MeV en sentidos contrarios. La aparición de radiación gamma de energía 0.51 MeV es evidencia de emisión de positrones.

Ejemplos de radionucleidos que decaen por emisión de positrones son: ${}^{11}\text{C}$ ${}^{18}\text{F}$ ${}^{13}\text{N}$ ${}^{15}\text{O}$. Estos nucleidos, isotópicos con elementos constitutivos de las biomoléculas son muy utilizados en investigación biomédica, por ejemplo, de fisiología cerebral.

Otra forma en que los radionucleidos cuya relación N/Z es menor que la correspondiente a sus isótopos estables pueden acercarse a la estabilidad es la captura electrónica, proceso que consiste en la captura de un electrón orbital por un protón nuclear con la consiguiente formación de un nuevo neutrón.



El nucleido hijo generado es el mismo que se obtendría por emisión de positrones.

**Ejemplo:**

En la captura electrónica la única partícula emitida es el neutrino, o sea que la energía liberada en la transformación puede permanecer como energía de excitación del núcleo hijo o ser liberada como energía cinética del neutrino. El neutrino será entonces, a diferencia de lo que ocurre en la emisión β^+ , monoenergético.

La captura electrónica involucra casi siempre a electrones de la capa K, ya que por ser los más cercanos al núcleo, la probabilidad de ser capturados es mayor. La captura de electrones de las capas L o M es menos frecuente y ocurre sólo cuando la energía disponible es insuficiente para remover los electrones K, que son los más fuertemente unidos.

La captura electrónica da lugar a un hueco en la capa K el que será llenado por un electrón más externo. En el proceso se emiten rayos X de energía igual a la diferencia de energía entre las capas. Existe también la posibilidad de que la energía del rayo X sea cedida a un electrón de una capa más externa, pudiendo éste ser arrancado del átomo y eyectado con una cierta energía cinética determinada por la diferencia entre la energía del rayo X y la energía de ligadura del electrón expulsado. Estos electrones se denominan electrones Auger y serán, a diferencia de los β^- , monoenergéticos. Todas estas posibilidades son ilustradas por la Figura VIII.

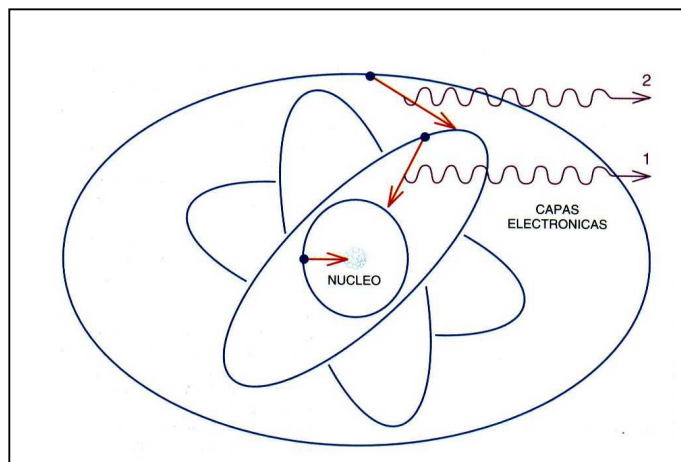


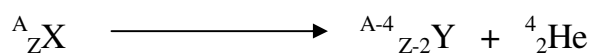
FIGURA VIII

Como ya se mencionó, la emisión de positrones requiere una diferencia de energía mínima entre los nucleidos padre e hijo de 1.02 MeV. La captura electrónica, en cambio, tiene requerimientos energéticos mucho menores. Basta con que la masa del nucleido padre sea superior a la del hijo. El Δm se calculará, en este caso, restando las masas atómicas del padre y del hijo, ya que la primera incluye la masa del electrón capturado por ser uno de los propios electrones orbitales.

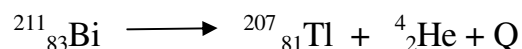
$$\Delta m = m \text{ atómica padre} - m \text{ atómica hijo}$$

Cuando la energía disponible es superior a 1.02 MeV, tanto la emisión de positrones como la captura electrónica son energéticamente posibles pudiendo ocurrir los 2 procesos en forma competitiva. Al aumentar la energía la relación β^+/CE crece pero si aumenta Z , y por ende la carga nuclear, los electrones, que son más fuertemente atraídos por el núcleo, se encuentran más cerca de él aumentando la probabilidad de que ocurra la captura electrónica.

En el caso de los núcleos pesados (generalmente $Z > 83$), el modo preferido de acercarse a la estabilidad es por medio de la emisión de una partícula alfa. Existen, sin embargo, algunos pocos casos de emisores α entre nucleidos livianos, como por ejemplo el ^8Be . Mediante este proceso se logra reducir el número de masa en 4 unidades y la carga nuclear en 2 por la emisión de un núcleo de ^4He .



Ejemplo:



Las partículas alfa emitidas tienen o una única energía (si el decaimiento deja al nucleido hijo en su estado fundamental) o un número limitado de energías discretas correspondientes a estados excitados del nucleido hijo. Ejemplos de emisores α son: ${}^{210}\text{Po}$, ${}^{238}\text{U}$, ${}^{211}\text{At}$, etc. Para calcular el Δm para la emisión de partículas alfa basta emplear la masa atómica del ${}^4_2\text{He}$ para corregir los 2 electrones menos que tiene el nucleido Y respecto a X.

Ya fue comentado anteriormente que en muchas ocasiones los procesos de decaimiento conducen a un estado excitado del nucleido hijo. Esa energía adicional del producto es liberada a través de una o más emisiones gamma hasta alcanzar el estado fundamental. Este proceso da lugar a un núcleo hijo con los

mismos valores de A y Z que el padre. La emisión gamma es un cuanto de alta energía y carece de masa. Es un tipo de onda electromagnética de alta energía que surge por acomodamiento de niveles energéticos nucleares. $\Delta E = E_2 - E_1 = E_\gamma$.

La desexcitación de los núcleos se producen generalmente en un tiempo muy corto 10^{-11} s, o sea prácticamente en forma simultánea con el decaimiento anterior. En ciertos casos especiales, sin embargo, un núcleo permanece en estado excitado un tiempo considerablemente mayor, por ejemplo, 650 años para el ^{192m}Ir . Cuando un nucleido tiene un estado excitado con período de semidesintegración superior a 1 segundo se dice que está en un estado metaestable. La transición entre un estado metaestable y el estado fundamental se denomina transición isomérica. Si el nucleido en estado metaestable puede ser aislado del nucleido padre tenemos un emisor gama puro de gran utilidad médico diagnóstica.

Ejemplo:



En ciertos casos la diferencia entre 2 estados energéticos nucleares no aparece como un cuanto γ sino que es transferido a un electrón orbital, el cual escapa del átomo, bajo la forma de electrones monoenergéticos llamados _electrones de conversión interna. Es de destacar que la energía de ellos es única e igual a la diferencia de energía de los estados nucleares (ΔE), a la que se le debe restar la energía de enlace del electrón arrancado. Los electrones de conversión provienen mayoritariamente de la capa K, con porcentajes menores para las capas L y M. Luego de la remoción del electrón de conversión se producen huecos que son llenados por electrones más internos generándose rayos X y electrones Auger.

En la Figura IX se resumen todos los modos de decaimiento principales, ya analizados.

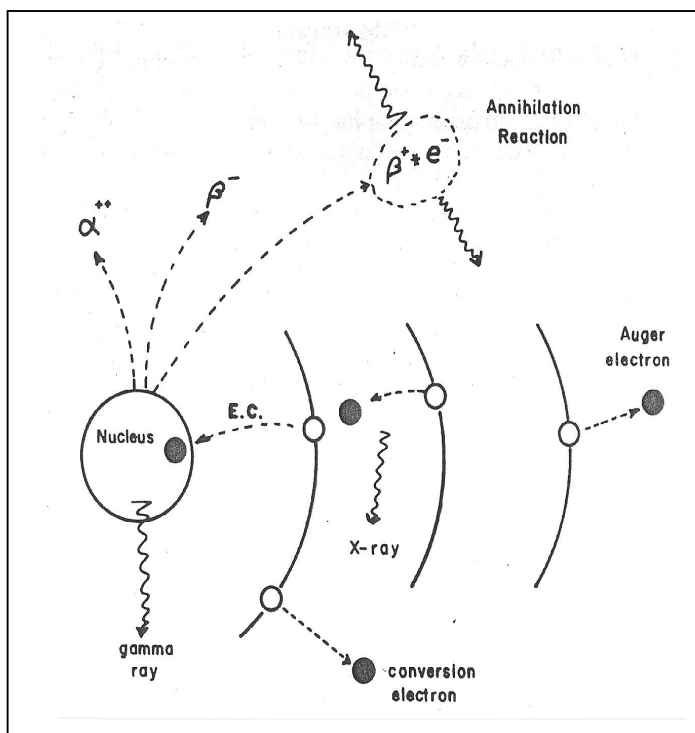


FIGURA IX

El decaimiento radiactivo es un proceso al azar. No es posible predecir que átomo de un grupo de átomos se desintegrará en un momento determinado. Sólo se puede conocer el número promedio de átomos desintegrados por unidad de tiempo. La probabilidad de decaimiento es una propiedad característica de cada nucleido y es independiente de las condiciones físicas (temperatura, presión, etc.) y químicas (estado de combinación del elemento).

Consideremos el caso más simple de un nucleido A que emitiendo una partícula X se transforma en otro nucleido B estable. El número de átomos de A que decae por unidad de tiempo es proporcional al número de átomos (N) presentes en la muestra en ese momento ya que el decaimiento radiactivo sigue una cinética de primer orden (Ecuación 1).

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (1)$$

λ se denomina constante de desintegración y representa la probabilidad de decaimiento por unidad de tiempo, siendo característica de cada radionucleido.

$-\frac{dN}{dt}$ es la velocidad de desintegración y se denomina actividad (A)

Sustituyendo en (1) obtenemos $A = \lambda N \quad (2)$

Integrando la ecuación (1) entre 0 y t, llegamos a que

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

donde N_0 es el número de núcleos a $t = 0$

Esta ecuación de tipo exponencial, característica de los procesos con cinética de orden 1, implica en un dado intervalo de tiempo decaerá siempre la misma fracción de los núcleos iniciales. Es posible, por lo tanto, definir el periodo de semidesintegración ($T_{1/2}$) como el tiempo en el cual decaerán la mitad de los núcleos presentes.

$$N_{(T_{1/2})} = N_0/2$$

y sustituyendo en la ecuación 3 llegamos a que

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (4)$$

Graficando $\ln N$ vs t (Figura X) obtenemos una recta cuya ordenada en el origen será N_0 y su pendiente $-\lambda$. De esta manera es posible determinar el período de semidesintegración gráficamente.

Si ahora multiplicamos por λ la ecuación (3) a ambos lados de la igualdad y tenemos en cuenta lo expresado en la ecuación (2) llegamos a:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (5)$$

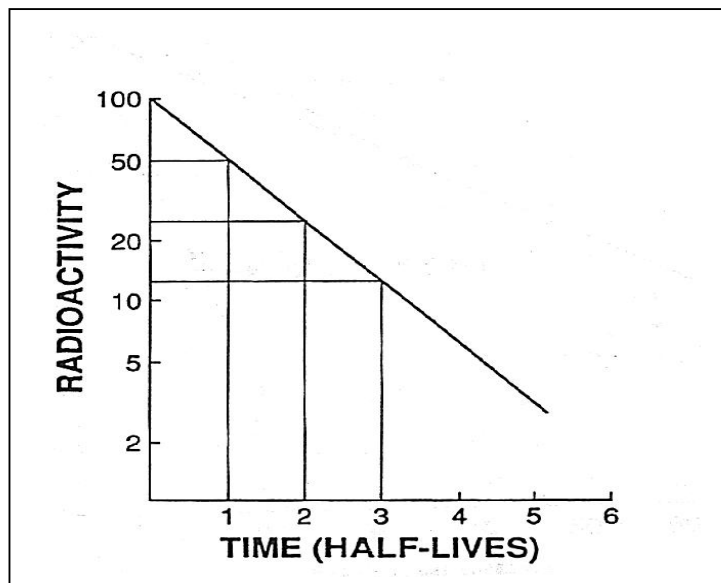


FIGURA X

La actividad de una muestra radiactiva, al igual que el número de átomos, decrece en forma exponencial con el tiempo. El período de semidesintegración es también el intervalo en el cual la actividad disminuye a la mitad.

La unidad de actividad en el sistema internacional es el Becquerel (Bq), que equivale a un núcleo desintegrado por segundo. Esto se denota como 1 dps (desintegración por segundo). Sin embargo la unidad tradicional de actividad, y que continúa siendo la más ampliamente utilizada, es el Curie. Históricamente definido como la actividad de 1 gramo de radio, su equivalencia exacta con el Becquerel es la siguiente: $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$. Niveles de actividad normalmente empleados en el laboratorio son: $1 \text{ mCi} = 3.7 \text{ MBq}$, $1 \mu\text{Ci} = 37 \text{ KBq}$.

Volviendo a la ecuación (2) $A = \lambda N$, vemos que la actividad de una muestra radiactiva es proporcional a la cantidad de átomos presentes y por lo tanto a su masa. La actividad es, pues, una medida de la cantidad de sustancia. Otras magnitudes relacionadas a la masa pueden redefinirse para muestras radiactivas. La concentración de actividad, por ejemplo, será la actividad por unidad de volumen y la actividad específica la actividad por unidad de masa, tomándose como unidad de masa el gramo y sus submúltiplos, así como el mol y sus submúltiplos.

La concentración de actividad es un parámetro útil cuando disponemos de sustancias radiactivas en solución. Disminuirá con el tiempo siguiendo la ecuación exponencial del decaimiento radiactivo.

$$C_{\text{ACT.}} = C_{(\text{ACT})0} e^{-\lambda t}$$

La actividad específica indica la relación entre la cantidad de átomos radiactivos y no radiactivos (del mismo elemento y en la misma forma química) en una muestra que contiene átomos no radiactivos ("fríos") como portadores. Una muestra designada "carrier free" contiene exclusivamente átomos radiactivos.

La información acerca de todos los nucleidos conocidos, tanto estables como radiactivos se encuentra resumida y ordenada en forma sistemática en la Tabla de Nucleidos. Se trata de una especie de gráfica de Z vs. N

en la que cada nucleido se encuentra representado por un recuadro que contiene datos como modos de decaimiento, período de semidesintegración, energía, etc. La figura XI nos muestra un esquema de ella.

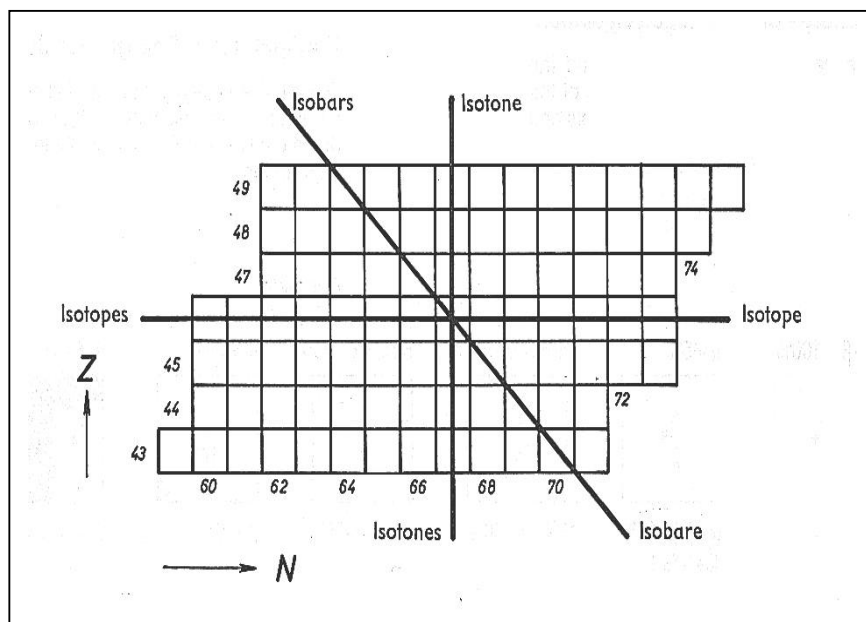


FIGURA XI

Los nucleidos están ordenados horizontalmente por número de neutrones creciente y verticalmente por número de protones creciente. Cada línea horizontal contiene todos los isótopos de un mismo elemento y cada línea vertical todos los isotones. Cuando existen isómeros el recuadro está subdividido en partes, cada una correspondiente a uno de ellos. El o los modos de decaimiento se indican mediante un código de colores. El negro representa habitualmente a los nucleidos estables, el azul a los emisores β^- , el rojo a los β^+ y a los que experimentan captura electrónica (ϵ), mientras que el amarillo simboliza el decaimiento α . Cuando el nucleido decae por varios modos existen en el recuadro principal partes con los colores correspondientes y el tamaño relativo de cada una de ellas nos indica cualitativamente los porcentajes. Los valores de energía que figuran no son todos los posibles, sino solamente los más abundantes. En la Fig. XII vemos algunos ejemplos.

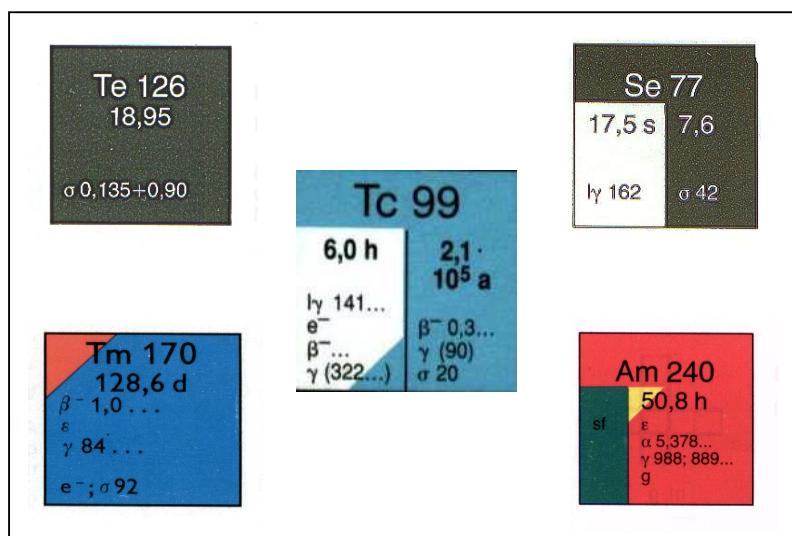


FIGURA XII

Otra forma de mostrar la información relativa a los radionucleidos es mediante los *Esquemas de decaimiento*. Se trata de diagramas de energía vs. Z , en que aparecen los distintos niveles de energía de los nucleidos padre e hijo representados mediante líneas horizontales y los modos de decaimiento simbolizados a través de flechas. La dirección de la flecha muestra la variación experimentada por el Z como consecuencia de cada tipo de transición. Datos adicionales como período de semidesintegración y porcentaje de decaimiento por cada modo también pueden ser encontrados en estos esquemas. La Fig. XIII muestra la representación de cada tipo de decaimiento en dichos esquemas.

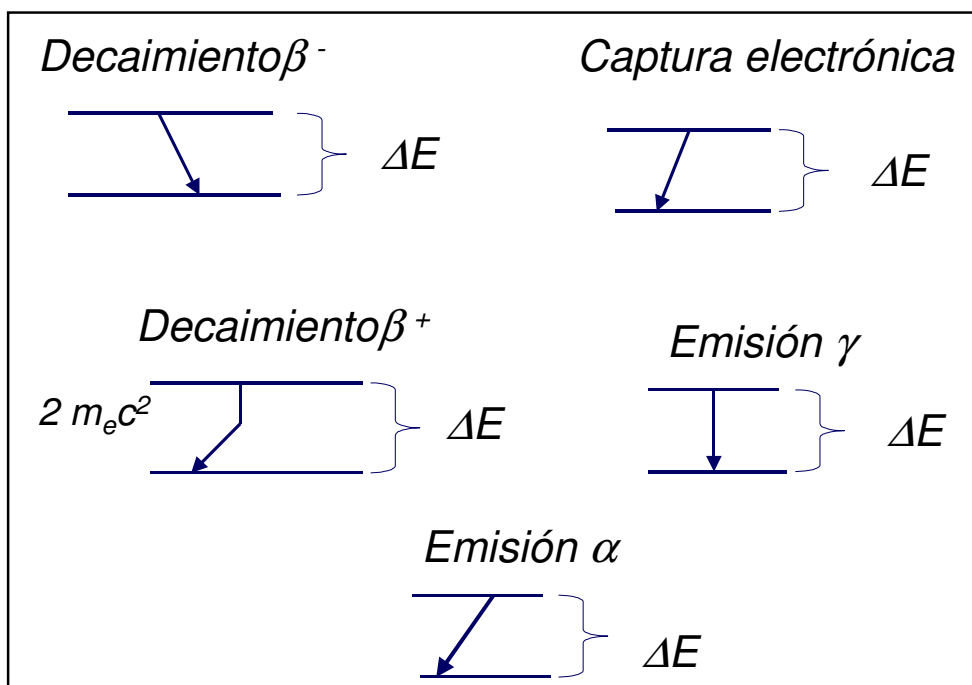


FIGURA XIII

Para entender mejor lo anterior observemos el esquema de decaimiento correspondiente al ^{64}Cu (Figura XIV). Este nucleido presenta decaimiento β^- , con formación de ^{64}Zn y β^+ + captura electrónica, que conducen al ^{64}Ni . El ^{64}Zn se forma en su estado fundamental mientras que el ^{64}Ni presenta un estado excitado, de modo que durante la captura electrónica (pero no en el decaimiento β^+) se observa la emisión simultánea de un rayo γ . Es de destacar que la emisión de la radiación de aniquilación que acompaña al decaimiento β^+ se simboliza mediante una porción vertical en la flecha correspondiente a dicho decaimiento.

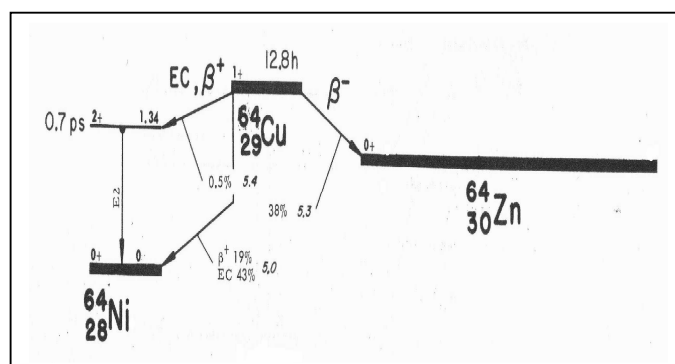


FIGURA XIV