

**CURSO REGIONAL DE INVESTIGACION**

**SOBRE LA PRACTICA DE LA**

**RADIOFARMACIA HOSPITALARIA**

O.I.E.A. - UNIVERSIDAD DE LA REPUBLICA

MONTEVIDEO - URUGUAY

13 DE JUNIO - 1 DE JULIO 1994

**FISICA DE LAS RADIACIONES**

Ing. Quím. Ana M. Robles

Departamento de Radiofarmacia  
Centro de Investigaciones Nucleares

*Reproducción de Material Gráfico - Gentileza de Xerox Uruguay S.A.*

1

**FISICA DE LAS RADIACIONES**  
**Ing. Quím. Ana M. Robles****INTRODUCCION**

El contenido de este capítulo es meramente un resumen de la extensión de los conocimientos necesarios y para una mayor información es aconsejado remitirse a los textos básicos que se enumeran en la bibliografía.

**DESARROLLO HISTORICO**

A fines del siglo XIX y principios del XX se puso finalmente en duda la indivisibilidad del átomo. Fueron descubiertos los rayos catódicos y rayos X (Roentgen, 1895) y el fenómeno de la radiactividad (Becquerel, 1896) lo que puso en evidencia la naturaleza compleja del átomo.

Geiger y Marsden (1909) demostraron que el número de cargas elementales que componen el centro del átomo es aproximadamente igual a la mitad del peso atómico. Se estableció el concepto de NUMERO ATOMICO que permitió solucionar algunas discrepancias que existían en la Tabla Periódica de Mendeleev.

En 1911, Neils Bohr estableció en sus postulados históricos que el átomo está constituido por núcleo y electrones orbitales por lo que en ese año puede definirse que nació la FISICA NUCLEAR, entendiéndose como tal la parte de la ciencia que estudia las propiedades y configuración del núcleo atómico.

Una vez establecida la existencia de un centro masivo de cargas positivas, se abandonó la teoría electromagnética de la configuración del átomo. Se postuló la existencia de órbitas en las cuales el electrón no radia energía.

Soddy descubrió que por emisión de partículas alfa se producía un cambio en las propiedades químicas del átomo y que se obtenía algo que correspondía a un desplazamiento en la tabla periódica, de dos lugares hacia la izquierda y que en la emisión de partículas beta se producía un cambio que correspondía a un desplazamiento de 1 lugar en sentido contrario.

Se identificó la partícula alfa como el núcleo cargado de un átomo de helio mientras que las partículas beta, mucho más livianas, con carga de signo contrario, similares a otras ya descubiertas en los tubos de alto vacío. También descubrieron que un elemento después de una emisión de una partícula alfa y de dos partículas beta retenía las mismas propiedades químicas pero que exhibía una diferencia de masa equivalente a la pérdida de una partícula alfa.

Se dedujo que el fenómeno de la radiactividad era un proceso de desintegración nuclear espontánea.

Se postuló la existencia de los isótopos (Soddy, 1910).

En 1919 fueron identificados los protones (Rutherford, 1919) y en 1932 se descubrieron los neutrones (Chadwick, 1932). Quedó demostrado que el núcleo está compuesto de protones y neutrones y que la partícula alfa es un núcleo de helio compuesto por 2 protones y 2 neutrones (Rutherford, 1909).

Desde entonces se considera que el átomo está constituido por un número determinado de tres tipos de partículas, protones, neutrones y electrones.

La masa de cada uno de los nucleones (protones y neutrones) es unas 1800 veces mayor que la de un electrón y el total de nucleones se encuentra constituyendo el núcleo atómico en un espacio de dimensiones 10000 veces más pequeño que el átomo en total (radio nuclear del orden de  $10^{-13}$  cm).

Los nucleones se mantienen en ese espacio en forma estable mediante la acción de fuerzas nucleares de atracción mucho más intensas que las fuerzas de repulsión coulombiana (aproximadamente 100 veces más intensas) y las gravitatorias (unas  $10^9$  veces más intensas).

Las fuerzas nucleares tienen un alcance muy reducido (del orden de  $10^{-13}$  cm) en comparación con las fuerzas electromagnéticas que decrecen más lentamente, con la ley de la inversa del cuadrado del radio ( $1/r^2$ ). Por lo tanto, las partículas nucleares, separadas una distancia mayor de  $10^{-12}$  cm, serán fuertemente repelidas en tanto que dentro del espacio nuclear se mantienen unidas.

Alrededor del núcleo atómico a una distancia del orden de  $10^{-8}$  cm se encuentran los electrones cargados negativamente girando en nubes orbitales.

El proceso de transformación de los núcleos atómicos va acompañado de emisión de partículas similares a los electrones (emisión beta) y de radiaciones (antineutrinos) (Teoría del decaimiento Beta, Fermi, 1934), de positrones (neutrinos) (Anderson, 1932) de fotones de gran energía (cuantos de radiación gamma, Planck, 1904), partículas alfa.

La emisión beta y la de positrones es mediada por efecto de fuerzas de interacción débiles, la emisión de fotones es mediada por la acción de fuerzas electromagnéticas y dichas partículas no constituyen parte del núcleo sino que son formadas en el momento de la emisión. Son partículas llamadas elementales ya que no pueden desdoblarse ni descomponerse en otras lo que las diferencia de las partículas alfa.

Del estudio de las transformaciones nucleares se postuló la existencia de partículas de masa intermedia entre el nucleón y el electrón a las que se les llamó mesones (Anderson, 1936) y que corresponden a los cuantos de las fuerzas nucleares de interacción fuerte.

Cada partícula se caracteriza por propiedades como masa, espín (momento propio de la cantidad de movimiento que describe el estado de rotación de la partícula) el espín isotópico, la carga eléctrica, la carga bariónica (en las partículas pesadas y nucleones), la carga leptónica (características de los neutrinos, antineutrinos, electrones y positrones, mesones, muones), la paridad (característica de las partículas pesadas y también de los fotones) y el momento magnético, el esquema de desintegración, el período de semidesintegración o la media vida y otras propiedades extrañas características de ciertas partículas como los bosones y los cuarks descubiertas en los años 70-80.

La mayoría de las propiedades tienen valores determinados como la carga (múltiplos de la carga del electrón, positiva o negativa) y la paridad ( $\pm 1$ , 0) en cambio la masa varía desde 0 (el fotón y los neutrinos y antineutrinos) hasta un orden de 200000 veces la masa del electrón (los bosones con una masa de 175000 veces  $m_e$ ). La vida media varía desde infinito en las partículas estables (el electrón, el protón(\*), el neutrino y el fotón) hasta  $10^{-18}$ - $10^{-19}$  seg en algunos mesones pasando por otras de vida intermedia como los muones (cerca de  $10^{-6}$  seg).

Estas últimas llevan la denominación de cuasiestables ya que son estables frente a la interacción fuerte. Entre las partículas inestables la de más larga vida media es el neutrón, emisor de partículas beta con un  $T_{1/2}$  de 10.5 min.

(\*) Recientemente se ha encontrado que el protón tiene un periodo de semidesintegración de  $10^{30}$ - $10^{32}$  años.

En todos los procesos de interacción fuerte, electromagnética y débil se cumplen las leyes de conservación de la energía y la masa, del impulso y la cantidad de movimiento, de la carga eléctrica, bariónica y leptónica. Además en los de interacción débil y electromagnética se cumple además las leyes de conservación de la paridad y en las de interacción fuerte, se cumple la ley de conservación del espín isotópico.

Cada partícula elemental con espín  $\frac{1}{2}$  tiene una antipartícula (en el caso del fotón la antipartícula es idéntica a él).

El positrón es la antipartícula del electrón. Fue pronosticado en 1928 y descubierto en la radiación cósmica en 1932. El antiprotón y el antineutrón fueron descubiertos en 1955 y 1956 respectivamente.

Partícula y antipartícula tienen iguales la masa, la vida media, el espín y las cargas (aunque de signo contrario) y el momento magnético opuesto.

El esquema de desintegración en las antipartículas inestables es idéntico al de las partículas respectivas respetando la consideración de que se obtienen las antipartículas de desintegración respectivas.

El encuentro de una partícula con su antipartícula conlleva un proceso de aniquilación, convirtiéndose en partículas de masa menor o en radiación electromagnética. En virtud de las leyes de conservación, la carga de todas las partículas que se forman a raíz de la aniquilación es 0 (por cuanto es igual a 0 la de todas las partículas que se aniquilan con sus antipartículas). Se libera la mayor parte de la energía conservada en la masa de las partículas transformándose en energía cinética de las partículas formadas.

Existen además otras partículas inestables frente a la interacción fuerte denominadas resonancias con vidas medias del orden de  $10^{-20}$ - $10^{-23}$  seg que es apenas superior al Tiempo de vida media nuclear  $\tau_{nucl}$  ( $5 \cdot 10^{-24}$  seg).

Tales resonancias se desintegran al instante de escapar de la región en la cual se formaron a una distancia que apenas supera el diámetro de la región del núcleo en donde se formaron.

Al igual que en otras partículas, se conocen la masa, el espín, las cargas, el esquema de desintegración, el espín isotópico, el tiempo de media vida (o mejor dicho su inverso el ancho de la banda de resonancia en unidades de  $h$  la constante de Planck/seg).

Los bosones de masa 175000 veces la masa del electrón, presentan una banda de resonancia de 2.5 GeV por consiguiente el tiempo de vida media es del orden de  $3 \cdot 10^{-23}$  seg. No obstante este tiempo es suficiente para interactuar con un radio de interacción débil del orden de  $2 \cdot 10^{-16}$  seg.

## NUCLEO ATOMICO

El núcleo atómico se caracteriza por poseer una elevada densidad ( $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>) proveniente de contar con casi el total de la masa del átomo condensado en un espacio físico muy pequeño.

Las fuerzas nucleares, de interacción fuerte que permiten que exista esa elevada densidad en el núcleo tienen las siguientes propiedades:

- \* no son fuerzas eléctricas porque actúan en forma independiente de la carga entre nucleones con la misma intensidad entre 2 protones que entre un protón y un neutrón.
- \* no son fuerzas gravitacionales porque las intensidades que éstas manifiestan son mucho más pequeñas.
- \* las interacciones debidas a las fuerzas nucleares ocurren en un tiempo mucho más pequeño que el de las debidas a las fuerzas electromagnéticas.
- \* las fuerzas nucleares presentan la propiedad de saturación, es decir que cada nucleón interactúa con un número reducido de otros nucleones, solo los que están más cerca.
- \* Las fuerzas nucleares dependen del espín de los nucleones que interactúan, es decir que si dos nucleones tienen espines antiparalelos difícilmente podrán formar un núcleo compuesto,

en cambio si son paralelos la intensidad es suficiente para la fusión.

\* en el curso de una interacción nuclear entre un protón y un neutrón se produce un intercambio de sus cargas eléctricas de modo que al final del proceso el neutrón se transforma en un protón y viceversa. En esta interacción intervienen los mesones  $\pi$  (los cuantos de la interacción nuclear).

El número de protones es el número atómico (Z). Para algunos núcleos llamados estables  $\beta$  se cumple una relación empírica entre Z y el número másico (A)

$$Z = A / (1.98 + 0.015A^{2/3})$$

Los núcleos con igual número de protones y que difieren en el número de neutrones, es decir que pertenecen al mismo elemento pero tienen masas distintas, se denominan ISOTOPOS.

Los núcleos con igual número de nucleones pero el número atómico es diferente, son llamados ISOBAROS.

Los núcleos que tienen igual número de neutrones se llaman ISOTONOS y en ellos el número de protones y por ende la masa es diferente.

El núcleo atómico puede describirse superficialmente como una esfera de radio

$$R = r_0 * A^{1/3}$$

en donde  $r_0$  es el radio de Bohr y vale  $1.2 * 10^{-13}$  cm.

La concentración de nucleones (n) es del orden de  $10^{38}$  nucleones/cm<sup>3</sup> de acuerdo con la relación:

$$n = A/V \quad \begin{array}{l} A \text{ es el número másico} \\ V \text{ es el volumen de una esfera} \end{array}$$

de radio R  $V = (4/3)\pi R^3$

$$n = \frac{A}{(4/3)\pi R^3}$$

La energía de los nucleones unidos por las fuerzas de atracción nucleares es menor que la de los mismos por separado. De acuerdo con la equivalencia entre masa y energía también la masa de los nucleones unidos por las fuerzas de atracción nucleares es menor que la de los mismos por separado.

La diferencia es denominada el DEFECTO MASICO expresado en unidades de masa atómicas y en unidades de energía lleva el nombre de energía de ligadura.

$$E_l(A, Z) = [Z * m_p + (A - Z) * m_n - M_{nuc}(A, Z)] * c^2$$

donde  $m_p$  es la masa de un protón

$m_n$  es la masa de un neutrón y

$M_{nuc}$  es la masa atómica del núcleo de número másico A y

número atómico Z

c es la velocidad de la luz

La unidad de masa atómica (uma) es la masa de un nucleon considerando como 12.0000 la masa del isótopo 12 de carbono.

Vale  $1.66 \cdot 10^{-24}$  g y su valor equivalente en energía es 931 MeV.

La energía se expresa en unidades de electrón-voltio siendo esta unidad equivalente a la energía cinética que adquiere un electrón sometido a un campo eléctrico con una diferencia de potencial de 1 voltio.

Su relación con el julio unidad de energía en el sistema MKS es

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Julios}$$

$$1 \text{ MeV} = 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ Julios}$$

$$1 \text{ MeV} = 1.6 \cdot 10^{-6} \text{ erg}$$

La energía de ligadura por nucleón es  $E_1/A$ . tiene un valor promedio de 8 MeV por nucleón para todos los núcleos y es una medida de la estabilidad nuclear ya que para arrancar un nucleón de un núcleo, hay que aportar una energía superior a 8 MeV y por el contrario al capturar un nucleón por el núcleo éste libera una cantidad equivalente de energía o queda en un estado excitado con un exceso de energía equivalente a 8 MeV.

En el modelo de la gota líquida del núcleo, según el cual el núcleo es una gota esférica llena de un líquido incompresible y superdenso ( $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>), la energía de ligadura puede estimarse de una ecuación semiempírica

$$E_1 = a \cdot A - b \cdot A^{2/3} - g \cdot \frac{Z^2}{A^{1/3}} - f \cdot \frac{(A/2 - Z)^2}{A} + d$$

donde a, b, g, f y d son constantes para todos los núcleos.

Cálculos exactos de la energía de ligadura han demostrado desviaciones respecto al modelo de la gota líquida principalmente en que la estabilidad depende del número de nucleones tal como lo determina que los más estables son los núcleos que poseen un número mágico de protones o de neutrones o de ambos (2, 8, 20, 50, 82, 126).

Esta propiedad se explica mejor mediante la representación del núcleo según el modelo en capas.

De acuerdo con este modelo el núcleo se crea o construye de la misma forma que las capas electrónicas del átomo.

El núcleo se caracteriza por el espín y el momento magnético.

El espín es un función compuesta de los espines de los nucleones

y de los momentos originados en el movimiento de los nucleones en el núcleo. El espín de un núcleo con A par y Z par es 0.

El momento magnético igualmente se compone de los momentos magnéticos de los nucleones y su distribución orbital. Así, para núcleos de A par y Z par el momento magnético es 0.

En estos núcleos cada par de nucleones compensa tanto sus espines como sus momentos magnéticos.

El núcleo atómico puede hallarse en distintos estados energéticos. El estado con energía mínima se denomina fundamental y los demás son estados excitados.

Los estados excitados se originan como resultados de las desintegraciones nucleares (desintegración alfa o beta) o también artificialmente en los procesos de bombardeo de los núcleos con partículas aceleradas). En estos casos la energía de excitación del núcleo se suma a la de ligadura de la partícula capturada así como parte de su energía cinética. El retroceso que sufren las partículas al interactuar interviene también en el balance de energías.

La masa del núcleo en estado excitado así como otras propiedades como el momento magnético, el espín, son por lo tanto mayores que los correspondientes valores del estado fundamental.

#### TRANSMUTACIONES NUCLEARES

Existen en la naturaleza un número de núcleos atómicos que presentan la propiedad de desintegrarse espontáneamente emitiendo partículas y radiación electromagnética (núcleos de uranio, torio, radio, americio).

Presentan RADIATIVIDAD NATURAL.

La RADIATIVIDAD ARTIFICIAL, (I. Curie, F. Joliot, 1934) fue descubierta a raíz de las experiencias de bombardeo de núcleos liviano con partículas alfa observándose que la propiedad de emitir partículas continuaba luego de que cesaba el bombardeo.

Este fenómeno se demostró que es similar a la radiactividad natural.

Las transformaciones de los núcleos por emisión de partículas y radiación electromagnética ocurren de acuerdo con una ley que dice que la velocidad de desintegración, es decir el número de núcleos que se desintegran en la unidad de tiempo, es directamente proporcional al número de núcleos que aun no se han desintegrado en un momento dado.

$$-(dN/dt) = \lambda N(t) \quad /1/$$

El coeficiente  $\lambda$  que caracteriza la velocidad de desintegración



radiactiva se denomina CONSTANTE DE DESINTEGRACION y representa la probabilidad de que un núcleo radiactivo se desintegre en la unidad de tiempo.

Cada núcleo radiactivo tiene una constante de desintegración característica y bien determinada. La magnitud  $\tau$  es el tiempo de vida promedio (mean life) y el  $T_{\frac{1}{2}} = 0.693\tau$  es el periodo de semidesintegración

La constante de desintegración es una de las más importantes características del núcleo radiactivo. En más de 800 especies identificadas hasta el presente no hay 2 que tengan el mismo valor de la constante. Es una constante individual de cada radionucleido.

La solución de la expresión diferencial /1/ conduce a la ecuación clásica del decaimiento radiactivo:

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

que describe el proceso de disminución del número de núcleos radiactivos con el transcurso del tiempo.

Como es un proceso estadístico, esta ley se cumple para un número de eventos de desintegración grande. Cada núcleo tiene una probabilidad de sufra una transformación en un instante dado. Esa probabilidad es independiente de la edad del núcleo y es la misma para todos los núcleos de la especie considerada.

Por la ley de las probabilidades estadísticas, en el conjunto de un gran número de núcleos idénticos siempre habrá procesos de desintegración ocurriendo en un instante dado.

La velocidad de desintegración es denominada ACTIVIDAD y se mide en unidades de Becquerel (Bq) equivalentes a 1 desintegración por segundo o en unidades múltiples de esa cantidad (KBq, MBq, GBq).

El Curie es la primera unidad de actividad empleada. Fue definida como la actividad equivalente a 1.000 g de  $^{226}\text{Ra}$ . En 1950 la Comisión Internacional de Unidades y Medidas le dio una nueva definición:

$$1 \text{ Ci} = 3.7 * 10^{10} \text{ dps (desint. por seg)}$$

$$1 \text{ Ci} = 3.7 * 10^{10} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ Ci} = 37 \text{ GBq}$$

$$1 \text{ mCi} = 37 \text{ MBq}$$

$$1 \text{ }\mu\text{Ci} = 37 \text{ KBq}$$

El número de desintegraciones corresponde a la sumatoria de todos los procesos que están en competencia por lo que se debe conocer

el esquema de desintegración antes que la cantidad de cualquier muestra pueda ser expresada en términos de Ci o de Bq.

### MODOS DE DECAIMIENTO

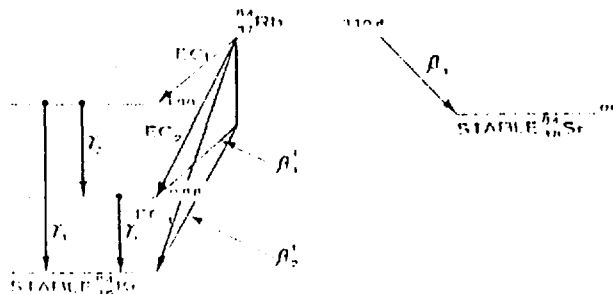
Los mecanismos de desintegración más importantes son:

- \* el decaimiento alfa, emisión espontánea de partículas alfa por núcleos de número atómico grande.
- \* el decaimiento beta, emisión o absorción espontánea de un electrón o un positrón por un núcleo.
- \* el decaimiento por emisión de fotones cuando un núcleo transita de un estado excitado a uno fundamental o de menor energía.
- \* la fisión espontánea en los núcleos de número atómico elevado
- \* otros mecanismos de desintegración por emisión de protones o neutrones retardados.

El esquema de desintegración representa los mecanismos por los cuales un núcleo tiene probabilidad de desintegrarse así como las energías de las transiciones que ocurren.

Cuando un núcleo sufre una transformación con desplazamiento del número atómico 1 unidad hacia la derecha en la tabla periódica, un vector hacia la derecha es dibujado desde el núcleo precursor hacia el descendiente. Lo mismo cuando se produce una disminución de 1 o 2 unidades en el número atómico a consecuencia de la transición nuclear.

Un esquema típico se presenta en la figura.



## DECAIMIENTO ALFA

Ocurre normalmente en los núcleos radiactivos con  $Z > 82$ . Un núcleo precursor inestable se transforma en otro mediante la emisión de una partícula alfa (número mágico de nucleones).

Energeticamente es favorable la transformación si la masa del núcleo precursor es mayor que la suma de la masa del núcleo descendiente más la masa de la partícula alfa

$$m_p > m_d + m_\alpha$$

La diferencia de energía se la lleva la partícula alfa y el núcleo descendiente como energía cinética.

La energía cinética asociada a la partícula alfa, en la mayoría de los núcleos radiactivos está comprendida entre 4 y 9 MeV. Esta energía es creciente por encima del número atómico  $Z = 60$  por lo que la inestabilidad respecto a la emisión alfa es **más probable**.

En cambio, los periodos de semidesintegración varían desde  $10^8$  seg hasta  $2 \cdot 10^{17}$  años.

Esta peculiaridad se explica por el efecto tunel que permite explicar que, a pesar de que la energía de la barrera coulombiana que debe superar la partícula para salir emitida, es del orden de 25 a 30 MeV, la probabilidad de atravesar esa barrera es alta (o lo que es lo mismo, la relación entre el cuadrado de la función de onda de la partícula antes y después de la barrera, llamado coeficiente de transparencia es alto considerando el número probable de colisiones de la partícula contra la barrera).

A mayor energía de la partícula alfa emitida supuso un mayor número de colisiones contra la barrera de potencial y por lo tanto un menor periodo de semidesintegración del núcleo precursor. Esta relación es consistente para un gran número de emisores alfa excepto para algunos como el  $^{210}\text{Po}$  y el  $^{211}\text{Rn}$  los que por tener una estructura de órbitas cerradas (números mágicos) presentan sus nucleones más fuertemente ligados que en otros radionucleidos.

La energía cinética de las partículas alfa tiene valores definidos para cada transición. El espectro es monoenergético con una estructura fina debida a pequeñas variaciones en energías emitidas a lo que se suma una pequeña proporción de partículas de largo alcance.

Todos los núcleos pesados emisores alfa pueden clasificarse en 4 categorías o series de decaimiento:

\* La serie del Thorio ( $4n$ ) en la que todos los miembros tienen números mágicos múltiplos de 4. El padre de la serie es el  $^{232}\text{Th}$  con un  $T_{1/2}$  de  $13.9 \cdot 10^9$  años (es aproximadamente 5 veces mayor que la edad de la tierra). Le sigue el  $^{236}\text{U}$  con un  $T_{1/2}$  de  $2.4 \cdot 10^7$  años

que actualmente no se encuentra en la superficie de la tierra naturalmente. La serie termina en el isótopo del plomo  $^{208}\text{Pb}$ .

\* La serie del Neptunio ( $4n+1$ ) que actualmente no se encuentra en la tierra ya que el padre de la serie el  $^{237}\text{Np}$  tiene un  $T_{\frac{1}{2}}$  de  $2.2 \cdot 10^6$  años. La serie ha sido reproducida artificialmente y termina en el isótopo estable  $^{209}\text{Bi}$ .

\* La serie del Uranio ( $4n+2$ ) es la serie más larga conocida. El elemento de la serie más longevo que se encuentra sobre la tierra es el  $^{238}\text{U}$  con un  $T_{\frac{1}{2}}$  de  $4.5 \cdot 10^9$  años. Es la serie más conocida, presenta una secuencia de emisiones alfa y beta que se repiten al principio y al final de la cadena de desintegraciones. Este comportamiento es característico de la serie del Thorio también (serie  $4n$  y la  $4n+2$ ). Termina en un isótopo del plomo el  $^{206}\text{Pb}$ .

\* La serie del Actinio ( $4n+3$ ). Comienza en el  $^{235}\text{U}$  que es el más longevo de los elementos de la serie identificados ( $T_{\frac{1}{2}}=3.4 \cdot 10^8$  años). Presenta numerosas ramificaciones y una serie lateral paralela que explica la aparición de algunos elementos en la naturaleza como el Francio y el Astatino.

En todas estas series existen ramificaciones que responden a la competencia entre los procesos de desintegración alfa y beta.

#### DECAIMIENTO BETA

El proceso de desintegración beta es esencialmente la transformación de un neutrón en un protón en el núcleo.

La probabilidad de la emisión, se debe al igual que en la emisión de partículas alfa a que la masa del núcleo precursor es mayor que la suma de las masas de los productos de la desintegración.

La emisión de una partícula beta por un núcleo inicialmente en estado estacionario, se transforma en otro núcleo cuya masa es del mismo orden de magnitud que la del precursor. Sufre un retroceso que es muy pequeño dada la masa del núcleo involucrado. Por lo tanto toda la energía de la transición, se la lleva el electrón como energía cinética.

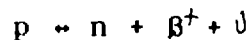
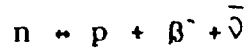
Sin embargo los electrones salen emitidos con un espectro continuo de energías a diferencia de las alfas. La aparente violación del principio de conservación de la energía hizo que en 1931 se debiera postular la existencia de una partícula que acompañara la emisión beta y diera cuenta de la diferencia de energía de la transición (Pauli, 1931). Esta partícula tenía la peculiaridad de no ser fácilmente detectable en condiciones normales por su débil interacción con la materia.

Hasta 1953-1954 no se descubrió experimentalmente tal partícula de masa y carga cero, con espín  $\frac{1}{2}$  el neutrino (antineutrino).

De esta forma se conserva el principio de la carga, el impulso

y la energía también se conservan y finalmente el espín, si la transición beta representa un cambio en 1 unidad en el número de protones o neutrones cambia la paridad y cambia el espín en  $\pm \frac{1}{2}$ . El neutrino (antineutrino) por lo tanto tiene que tener también espín.

Las transiciones tanto por emisión de partículas beta como de positrones se puede representar como



### DECAIMIENTO GAMMA

En el proceso de emisión de fotones el núcleo pasa espontáneamente de un estado excitado a otro menos excitado o al fundamental. En este caso el exceso de energía se libera en forma de cuantos de interacción electromagnética de corta longitud de onda más la energía de retroceso que es prácticamente despreciable.

Prácticamente todos los núcleos producidos en distintos tipos de transiciones dan lugar a estados excitados por lo que la emisión de fotones acompaña todos los procesos. La vida media de esos estados es del orden de los  $10^{-13}$  seg. Por otra parte ciertos radionucleidos producidos presentan períodos de semidesintegración de sus estados excitados que son sumamente largos del orden de los segundos, horas, días o años. Estos estados excitados se denominan metaestables por presentar una estabilidad medible frente a la desexcitación y la transición se denomina transición isomérica.

Los núcleos en ese estado se denominan ISOMEROS y presentan distintos la masa, el momento magnético, el espín, sus períodos de semidesintegración. Es como si fueran dos núcleos diferentes.

Con respecto a la energía del fotón, ésta es menor que la diferencia de energía entre el estado excitado y el fundamental (o de menor excitación). La diferencia la lleva la energía de retroceso. Por esta razón la misma energía del fotón no es suficiente para excitar otros núcleos. Existen casos muy particulares en ciertos núcleos que, a temperaturas muy bajas donde las vibraciones de los átomos es muy pequeña puede presentarse el fenómeno de emisión y absorción sin energía de retroceso. Este efecto de absorción resonante (Efecto Mössbauer) permite medir muy exactamente las energías.

La transición de un estado excitado a su estado fundamental puede ocurrir con la absorción total de la energía del fotón emitido por parte de un electrón del propio átomo. Esta interacción directa se denomina conversión interna y la energía convertida se transforma en energía del electrón que es liberado con una energía cinética igual a la diferencia entre la energía de la transición menos la de enlace del electrón en su nivel orbital.

A consecuencia de esta emisión, la vacante generada en el nivel orbital induce un reacondicionamiento de electrones y emisión de rayos X característicos y eventualmente otros electrones de menor energía (electrones Auger en los núcleos livianos).

Dado que ni el proceso de desexcitación por emisión de fotones ni el proceso de conversión interna conllevan cambios en el número atómico, los rayos X son característicos del propio átomo que sufrió el proceso de conversión.

#### OTROS TIPOS DE DECAIMIENTO

El proceso de captura de un electrón orbital es una forma de desintegración beta que compite con la emisión de positrones.

Muchas sustancias radiactivas, en las cuales la energía de transición es insuficiente para la emisión de positrones, se desintegran por procesos de captura de un electrón orbital.

La captura K (es decir la captura de un electrón de la capa K) es el mecanismo más probable pudiendo también presentarse la captura L o M.

Rayos X característicos del átomo del núcleo descendiente son observados a raíz de este proceso de decaimiento.

El decaimiento protónico es un mecanismo de emisión espontánea de un protón por un núcleo con un déficit muy importante en el número de neutrones.

La radiactividad protónica se observó por vez primera en 1982 por el núcleo de  $^{151}\text{Lu}$  que presenta 24 neutrones menos que su estable  $^{175}\text{Lu}$ .

La fisión espontánea de los núcleos con Z mayor o igual a 90 en dos fragmentos de núcleos de masa aproximadamente la mitad del núcleo precursor, es un proceso que conlleva una enorme liberación de energía (del orden de los 200 MeV). El núcleo precursor tiene una masa superior a la suma de las masas de los fragmentos. El proceso de la fisión se explica exitosamente mediante el modelo de la gota líquida en la que las fuerzas nucleares por su propiedad de ser saturables presentan la probabilidad de escindirse en dos fragmentos.

La fisión inducida por la absorción de un neutrón fue un fenómeno descubierto en 1939 (Hahn, Strassmann, 1939) y ha sido extensamente estudiado con distintos fines.

La emisión de neutrones retardados en los núcleos pesados es un proceso que se inicia por la emisión beta por el núcleo precursor formándose un descendiente en estado altamente excitado. En una segunda etapa de la transición, se libera un neutrón el cual por salir emitido luego de la emisión beta, se denomina retardado.

El fenómeno es tal que el período de semidesintegración de la

emisión de neutrones es idéntico al de la emisión beta.

**BIBLIOGRAFIA**

Evans, R.D. The Atomic Nucleus. XIV ed. (1972) MacGraw-Hill Inc.  
ICCCN 55-7275-19750

Eisberg, R.; Resnick, R. Física Cuántica. LIMUSA ISBN 968-18-  
0419-8 (1979)

## TABLA DE LOS RADIONUCLEIDOS

## CHART OF THE NUCLIDES

M.S. ANTHONY

STRASBOURG 1992

Centre de Recherches Nucléaires et Université Louis Pasteur

67037 Strasbourg Cedex 2

France

Data Treatment: Benoît Speckel

Printed by: Jean-Claude Padrines

La Tabla de los Radionucleidos propuesta inicialmente por E. Segrè presenta todos los nucleidos estables y radiactivos, naturales y artificiales ordenados en un plano en función del número atómico Z en ordenadas y del número de neutrones N en abscisas.

En la Tabla están representados cada especie en un recuadro que contiene:

El símbolo del elemento al que pertenece y el número másico A  
El defecto de masa (Atomic Data and Nuclear Data Table, 39, 281, 1988)

El período de semidesintegración(\*)

La abundancia isotópica

el espín isotópico

Las principales emisiones producidas por su desintegración(\*)

Las secciones eficaces de absorción de neutrones térmicos.

(\*) cuando se trate de un nucleido inestable.

En los nucleidos estables no hay indicación de período de semidesintegración, tampoco en los inestables que no han sido identificados, que tienen un período muy corto o que han sido postulados como producto de una reacción nuclear.

Los estados metaestables indicados en los recuadros donde corresponda, representan las transiciones isoméricas, es decir las desexcitaciones con emisión de fotones y las transiciones con emisión  $\beta$  o fisión espontánea o  $\alpha$  cuyos períodos son mayores de 1 segundo.

Los datos entre paréntesis corresponden a valores no confirmados o de intensidad no determinada.



<p>Re 187 -41.222</p> <p>4.23E10 a 5/2 + <math>\beta^-</math> 0.0026 62.0% <math>\sigma</math> 1.6 + 75</p>	<p>elemento y número másico defecto másico experimental</p> <p>período de semidesintegración espín 5/2 y paridad + energía beta máxima en MeV abundancia isotópica sección eficaz de absorción de neutrones para la formación del estado metaestable + el fundamental del <sup>188</sup>Re.</p>
---	---

SIMBOLOS Y COLORES EMPLEADOS PARA DESCRIBIR LOS TIPOS DE DECAIMIENTO

Símbolo o color	significado
BLANCO	NUCLEIDOS ESTABLES
BLANCO + VERDE	NUCLEIDOS RADIATIVOS EMSORES α PRESENTES EN LA NATURALEZA
VERDE	EMISION α
CELESTE	EMISION DE β <sup>+</sup> O CAPTURA( )
NARANJA	EMISION β <sup>-</sup> Y DOBLE DECAIMIENTO β <sup>-</sup>
ROJO	FISION ESPONTANEA, FISIÓN RETARDADA A UN PROCESO DE CAPTURA, FOSION RETARDADA A UNA EMISION β
BLANCO	EMISION DE PROTONES
AMARILLO (↓)	TRANSICION ISOMERICA
γ	FOTONES
e <sup>-</sup>	ELECTRONES DE CONVERSION
p	PROTONES
*	RADIACION RETARDADA
n	NEUTRONES
ε	CAPTURA ELECTRONICA
βp, βn, βf	EMISION RETARDADA DE PROTONES O NEUTRONES O FISION LUEGO DE UNA EMISION β
2β	EMISION SIMULTANEA DE 2 PARTICULAS β

Los tamaños de las áreas coloreadas representan las probabilidades de los diferentes tipos de desintegración, los símbolos de los distintos modos de decaimiento anotados en orden de probabilidad decreciente

Los recuadros pequeños representan probabilidades menores del 5%.

Las líneas verticales en los recuadros representan los isómeros a la izquierda y el estado fundamental a la derecha.

Los defectos másicos están en unidades de energía (MeV) de modo que para calcular la masa atómica de cualquier especie (x) se procede :

$$m_x = A * U + \Delta M$$

donde  $m_x$  es la masa atómica de la especie (x)

$A$  es el número másico de la especie (x)

$U = 931.5016(3)$  MeV/uma

$\Delta M$  es el defecto másico experimental dado en la tabla para la especie (x)