

# Bases físicas de la Medicina Nuclear

## (Parte I)



R. de la Fuente\*\*  
P. Gely\*\*  
L. Villares\*\*  
J.L. Pérez Piqueras\*  
A. Sánchez Mayorga\*\*

### RESUMEN

De manera sucinta se describen las fases físicas de la Medicina Nuclear, comenzando por lo más elemental como es la estructura de la materia y la radioactividad, en cuyo apartado se estudia la estabilidad nuclear, la radiación electromagnética, vida media y actividad, así como los diferentes tipos de desintegración.

### SUMMARY

A short description is given of the physical bases of Nuclear Medicine, beginning with the most elemental such as the structure of the material and radioactivity, under which heading and in a simplified manner a study is made of nuclear stability, electromagnetic radiations, average life and activity, as well as the different types of disintegration.

### 1. ESTRUCTURA DE LA MATERIA

Si dividimos un cuerpo material hasta separarlo en los constituyentes más pequeños que mantienen sus propiedades químicas características, estas pequeñas unidades de materia son las **moléculas**. Si aún dividimos la molécula, perdiendo sus propiedades químicas, encontraremos los elementos básicos constituyentes de la materia: **los átomos**. Así, una molécula de agua ( $H_2O$ ) está compuesta por átomos de H y O. Cuando una sustancia está formada por un sólo tipo de átomos, hablamos de **Elemento** y si está formada por varios será un **Compuesto**.

Existen 92 elementos naturales, de distinto peso y propiedades químicas y algunos elementos producidos artificialmente por el hombre.

Así como la molécula mantiene las propiedades químicas del compuesto, el átomo mantiene las del elemento y durante muchos años fue definido como la parte indivisible de la materia, su propio nombre significa en griego "no divisible".

El átomo a su vez está formado por componentes más pequeños que se agrupan en dos estructuras: **el núcleo y la corteza**.

El núcleo central tiene un diámetro de  $10^{-14}$  m y soporta casi toda la masa del átomo. Consta a su vez de dos **partículas elementales: los protones y los neutrones**, con idéntica masa, pero con distinta carga, siendo el neutrón neutro y el protón positivo con una carga de  $1,6 \cdot 10^{-19}$  culombios. El número de protones de un átomo es el dato fundamental que establece su lugar en la tabla periódica y sus características químicas, es el **Número atómico (Z)**. La suma del número de protones más el de neutrones, es decir, de todas las partículas nucleares con masa, se denomina **Número Másico (A)**. Tanto a los protones como a los neutrones se les denomina **Nucleones**. Todo elemento queda perfectamente definido por su A y por su Z, denominándose **Núclido** a cualquier especie nuclear que posee un determinado número de protones y neutrones.

La forma habitual de representar cualquier núclido (X) es:

$$\begin{matrix} A \\ X \\ Z \end{matrix}$$

Lógicamente:  $A - Z = N$  (N = Neutrón)

Como ya apuntamos, el valor de Z es definitorio e inseparable de cada elemento y determina todas sus características químicas, pero el número de neutrones puede variar dentro de un mismo elemento. Esto nos introduce en el concepto de **ISOTOPO**.

Cuando dos núclidos tienen el mismo número de protones (Z), pero distinto número de neutrones (N), se denominan **Isótopos**, es decir: se trata del mismo elemento por tener el mismo Z y por lo tanto el mismo lugar en la tabla periódica, pero tienen distinto A y por lo tanto distinta masa. Cuando habitualmente nos referimos a un elemento natural, en realidad hablamos de un mezcla de isótopos en proporciones conocidas, unos estables y otros radiactivos. Son un ejemplo los siguientes isótopos del hidrógeno (tritio, deuterio e hidrógeno):

3	2	1
H	H	H
1	1	1

Dos núclidos pueden ser dos elementos distintos (distinto Z), pero pueden tener la misma masa por poseer idéntico A, en este caso decimos que dichos elementos son ISO-

\*\* Cap. de San. (Med).  
\* TCol. de San. (Med).  
Servicio de Medicina Nuclear  
Hospital Militar Central "Gómez Ulla"

BAROS (en griego "mismo peso"), por ejemplo:

40		40
K	y	Ca
19		20

Si dos núclidos sólo comparten el mismo número de neutrones, siendo distinto su A y Z, entonces son **ISOTONOS** entre sí, por ejemplo:

10		11
B	y	c
5		6

Recordemos que  $A - Z = N$

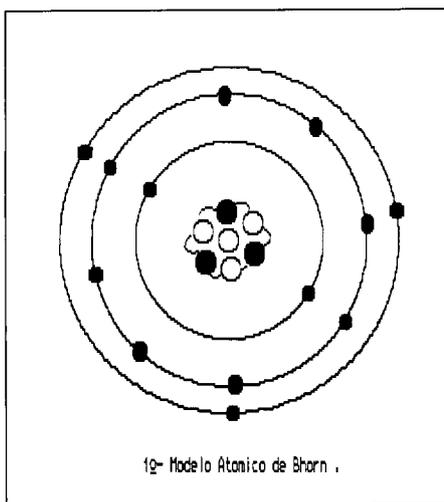
Finalmente, dos núclidos que compartan el mismo Z y A, pero se diferencien en su nivel energético, serán **ISOMEROS**: el núclido con mayor nivel energético se denomina **Excitado**. Si el núclido excitado permanece en este estado durante suficiente tiempo como para ser directamente observado, entonces esta excitación se llama **METAESTABLE**, por ejemplo:

99		99m
Tc	y	Tc
43		43

**La Corteza** exterior al núcleo se encuentra formada por los **Electrones** (e-), partículas de masa despreciable (1/1836 la del protón) y la misma carga que el protón pero de signo contrario. El número de electrones de la corteza es igual al número de protones del núcleo (Z), por lo que en condiciones normales el átomo es neutro. El diámetro de la corteza atómica es mucho mayor que el del núcleo, estimándose en  $10^{-10}$  m.

El modelo atómico de Bohr (fig. 1) dispone a los electrones en órbitas circulares concéntricas alrededor del núcleo, mantenidos en su lugar por la resultante de la fuerza centrífuga y la fuerza electrostática. De dentro a fuera las capas se denominan K, L, M, N, O ... y cada una viene determinada por un nivel energético denominado **Energía de ligadura** que es la energía que hay que aplicar para desprender un electrón de su órbita.

Los electrones se ordenan en las capas orbitales de dentro a fuera, rellenando la capa inferior antes de colocarse en otra superior, por esta razón, cuando alguna de las capas posea huecos "vacíos" (sin electro-



nes) siempre será la última. Las capas inferiores albergan siempre menos electrones que las superiores y su energía de ligadura es mayor: en los átomos grandes (con muchas capas) las órbitas exteriores con baja energía de ligadura pierden electrones con suma facilidad, p.e. los metales.

Cada capa puede contener un número máximo de electrones que depende de su número de orden (n) según su proximidad al núcleo y determinado por la fórmula:

$$2n^2$$

Así, la primera capa K (n = 1) podrá tener 2 electrones y la segunda L (n = 2) tendrá 8 electrones y así sucesivamente a excepción de la última que sólo contendrá 8 electrones como máximo.

El fenómeno de excitación se produce cuando un electrón se encuentra en una capa superior a la que le corresponde, el descenso a su nivel conlleva una emisión de energía en forma de **radiación electromagnética**.

## 2. RADIOACTIVIDAD

### 2.1. Estabilidad Nuclear

No todas las combinaciones posibles de protones y neutrones forman núclidos estables, el tamaño del núcleo resultante es fundamental para la **Estabilidad Nuclear**.

El peso total de un núcleo es menor que la suma de los nucleones que lo componen, esta diferencia se denomina **Defecto de Masa** (Dm), que se define como la cantidad de masa que se libera en forma de energía si formamos un núcleo a partir de los nucleones necesarios y también la energía que liberaría al separarse en sus componentes.

Según la ecuación de Eins-

tein, la masa perdida (Dm) puede convertirse en energía:

$$E = Dm \cdot c^2$$

Esta energía es la necesaria para que el núclido permanezca unido, por eso se denomina **Energía de Enlace**.

Si dividimos la energía de enlace entre los nucleones obtendremos la **Energía de Enlace por Nucleón**, que da idea de la energía necesaria para extraer un nucleón del núcleo. Comparando la energía de enlace por nucleón que tienen núclidos de distinta masa (A), se aprecia que esta asciende linealmente al número de nucleones hasta alcanzar un máximo de estabilidad en el Fe (A = 56) con una energía de enlace de 8.8 MeV (megaelectrón-voltio) por nucleón, aunque a partir de este punto el valor desciende según aumenta A, llegando a ser más evidente en los Núcleos Pesados (fig. 2).

Los Núcleos Ligeros (A < 20) suelen tener el mismo número de protones y neutrones, pero a medida que aumenta Z se produce un paulatino aumento del número de neutrones. En la figura 3 se aprecia este fenómeno, parece como si el exceso de neutrones tuviese como finalidad atenuar la repulsión que entre sí mantienen los protones en los núcleos grandes. Este mecanismo de estabilización tiene su límite en el núclido estable más pesado:

209
Bi
83

Todos los núclidos de A superior a 209 son inestables, es decir, tienen a la estabilidad mediante la emisión espontánea de partículas (emiten masa o energía); a este fenómeno se le denomina **Radiactividad**. De forma natural, los elementos radiactivos van convirtiéndose en otros más estables, perdiendo masa (o energía), hasta llegar finalmente a uno totalmente estable. De esta forma se genera una especie de cadena de elementos radiactivos que se suceden de "padres" a "hijos", son las **Series radiactivas**, de las que existen tres naturales: Uranio, Actinio y Torio. Las tres terminan en isótopos estables del plomo.

Hay una serie radiactiva artificial, la del Neptunio, que termina en el Bi estable.

En la naturaleza existen otros isótopos radiactivos, menos pesados, que no forman serie, p.e.:

14		40
C		K
6		19

## 2.2. Radiación Electromagnética

Se trata de radiación sin masa que se propaga a la velocidad de la luz (la luz también es una radiación electromagnética) en forma de ondas, cuya energía es proporcional a su frecuencia.

Una partícula cargada crea a su alrededor un campo eléctrico de intensidad decreciente con la distancia, si esa partícula se mueve en el espacio, creará un campo magnético añadido, denominándose el conjunto creado **campo electromagnético**, pero si la carga está sometida a un movimiento ondulatorio, el campo electromagnético variará con el tiempo en cada punto del espacio. La energía cradada se propagará centrifugamente como las ondas del agua al tirar una piedra en un estanque.

La unidad de radiación electromagnética es el **Fotón**, cantidad mínima de energía que se puede emitir. La energía global de la radiación depende de la energía de cada uno de los fotones que la componen. Planck la definió como el producto de su frecuencia ( $\nu$ ) por una constante  $h$  ( $h = 6,626196 \cdot 10^{-34}$ ):

$$E = h \cdot \nu$$

Cada fotón viene definido por su frecuencia, que determina su energía y condiciones de interacción con la

materia. Estas frecuencias tienen un rango muy amplio que abarca desde  $10^4$  a  $10^{22}$  ciclos/seg o lo que es lo mismo, de  $10^{-10}$  a  $10^8$  eV (electrón-voltio). De menor a mayor energía comienza en las Ondas Largas de radio, las Ondas Cortas, T.V., Luz Infrarroja, Luz Visible, Luz U.V., Rayos X y Rayos Gamma (Figura nº 4). El conjunto de posibles frecuencias de las ondas electromagnéticas se denomina **Espectro Electromagnético**, separado en distintas bandas de frecuencia que agrupan a partes del espectro con características similares.

## 2.3. Desintegración, Vida media, Actividad

La radiactividad es un fenómeno de naturaleza estadística, podemos saber que proporción de materia sufrirá transformación en un tiempo dado, pero nunca que átomo concreto y en que momento. La **desintegración radiactiva** viene determinada por la fórmula:

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

Donde  $N$  es el nº de átomos sin desintegrar en el tiempo  $t$ ,  $N_0$  el nº de átomos cuando  $t$  era 0 y  $\lambda$  (lambda) es la **Constante de desintegración** de cada radioisótopo.

El **período de semidesintegración** ( $T$ ) es el tiempo necesario para que un radionúclido quede reducido a la mitad, su valor se obtiene de la fórmula anterior:

$$N/2 = N_0 \cdot e^{-\lambda T} \quad T = \ln 2 / \lambda$$

$$T = 0,693 / \lambda$$

Este es el **T físico**, pero cuando deseamos saber el **T real** de un radioisótopo dentro de un organismo vivo, debemos hacer referencia a dos valores: el **T biológico**, que es el tiempo que tarda en reducirse a la mitad la cantidad de una sustancia en un organismo y el **T físico**. De la relación de ambos períodos para la misma sustancia en un organismo, surge el **T efectivo** que se define como el tiempo que tarda en reducirse a la mitad una sustancia radiactiva en un organismo.

La **Vida media** ( $\theta$ ) es el tiempo medio que un átomo radiactivo permanece sin desintegrarse, es decir, la esperanza de vida. Es el inverso de la constante de desintegración:

$$\theta = 1 / \lambda$$

Como vemos, las constantes que rigen la desintegración radiactiva ( $\lambda$ ,  $T$ ,  $\theta$ ) están íntimamente relacionadas:

$$T = \frac{0,693}{\lambda} = 0,693 \cdot \theta$$

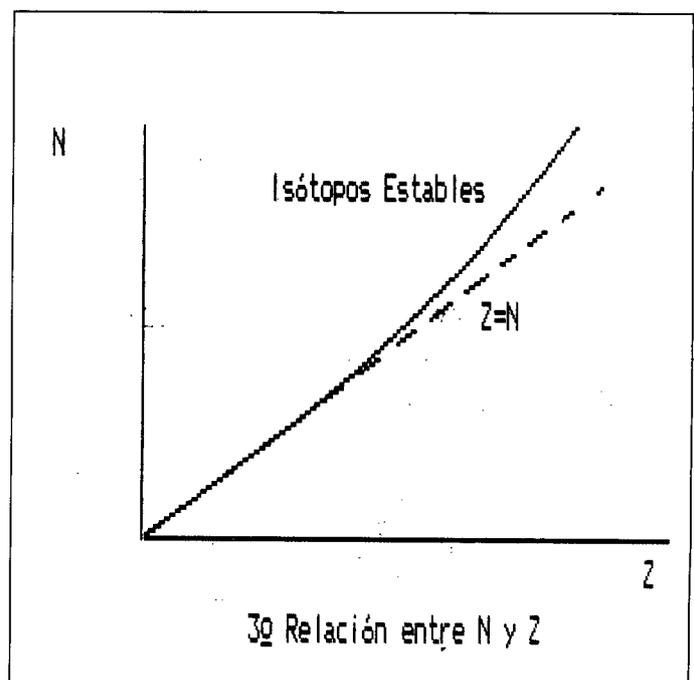
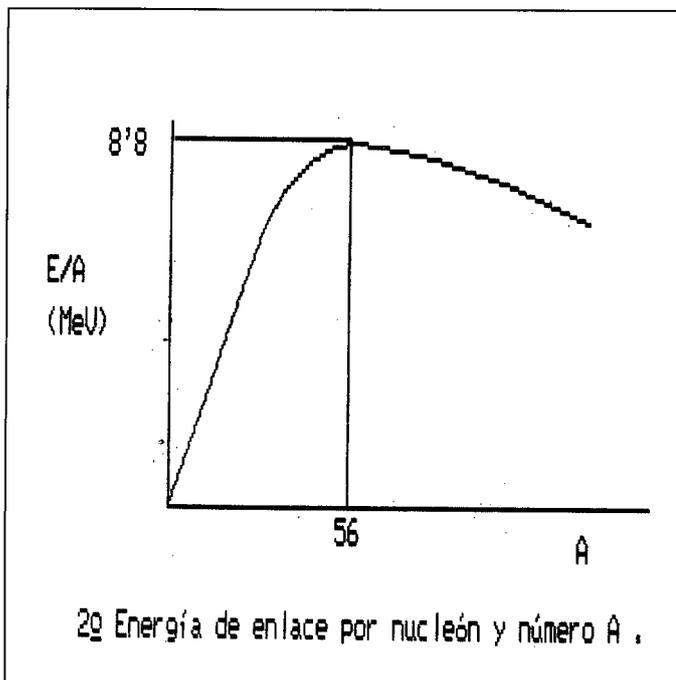
La **Actividad** de una muestra radiactiva es el número de desintegraciones que ocurren en la unidad de tiempo, es pues la velocidad con que la muestra se desintegra. Su valor puede deducirse de la fórmula general de desintegración radiactiva:

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

Siendo  $A$  la actividad en el tiempo  $t$  y  $A_0$  la actividad cuando  $t = 0$ .

## 2.4. Tipos de desintegración

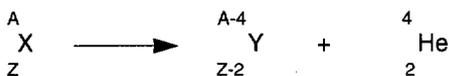
Al incidir sobre un campo magné-



tico, la radiación procedente de la desintegración de un elemento radiactivo natural (experiencia de Rutheford) sufre una separación en tres componentes: uno es desviado hacia el lado -, otro lo es hacia el + y el tercero no modifica su trayectoria; son respectivamente la radiación  $\alpha$ ,  $\beta^-$  y gamma.

A estos tres tipos de desintegración natural se unen otras de origen artificial: emisión  $\beta^+$ , captura electrónica, conversión interna, emisión de neutrones y transición isomérica.

**2.4.1. DESINTEGRACION ALFA:** son núcleos de átomo de helio (dos protones y dos neutrones). La pérdida de esta partícula por un núcleo ocasiona que su A descienda en 4 y su Z en 2:



El elemento "Y" ha descendido 2 lugares en la tabla periódica, respecto al elemento inicial "X".

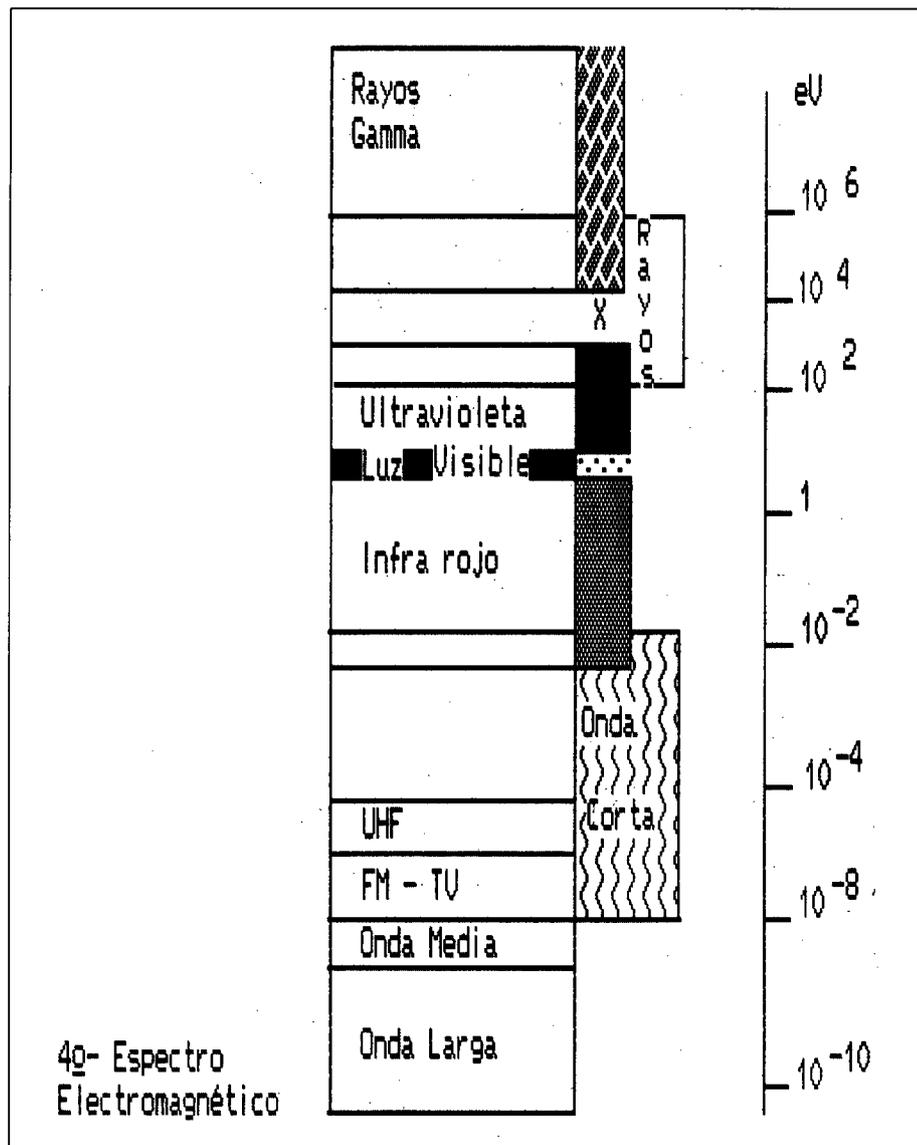
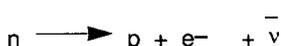
El espectro de energías de la radiación  $\alpha$  emitida es discontinuo (fig. 5), esto quiere decir que cada radionúclido emite una partícula con una energía cinética fija asociada. No obstante, cuando no toda la energía es cedida a la partícula y queda el núcleo hijo excitado, se pueden emitir partículas de diferentes energías, siempre fijas.

Las partículas  $\alpha$  son muy ionizantes, por lo que interaccionan intensamente con los primeros mm de espesor de cualquier material, quedando frenadas por una hoja de papel.

**2.4.2. DESINTEGRACION BETA NEGATIVA:** Al igual que la alfa, es un tipo de desintegración utilizado por los núclidos inestables para alterar su relación carga/masa y así transformarse en núclidos estables.

Se trata de la emisión de electrones a velocidad próxima a la luz.

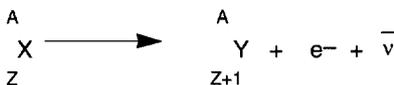
Puesto que el núcleo no posee  $e^-$ , estos proceden obligatoriamente de la transformación de otra partícula: el neutrón. Se produce la conversión espontánea de un neutrón en un protón, un electrón y un **antineutrino**.



49- Espectro Electromagnético

El antineutrino ( $\bar{\nu}$ ), como su antipartícula el neutrino ( $\nu$ ) son partículas sin masa y sin carga que se mueven a la velocidad de la luz, por lo que tienen escasa capacidad de interacción con la materia.

Como la desintegración  $\beta$  conlleva la pérdida de un neutrón y la adquisición de un protón por parte del núcleo que la sufre, este verá modificado su Z en una unidad más, permaneciendo su A inalterada.



X ha ascendido un lugar en la tabla periódica y se ha convertido en Y, emitiendo una radiación  $\beta^-$  de una energía máxima característica, con un espectro continuo (fig. 6).

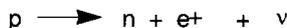
Serán emisores  $\beta^-$  aquellos que requieren perder neutrones para alcanzar la estabilidad nuclear, es decir, los que tienen "exceso de neutrones".

**2.4.3. DESINTEGRACION BETA POSITIVA:** Consiste en la emisión de **positrones** por un radionúclido. El positrón ( $\beta^+$ ) es la antipartícula del electrón ( $\beta^-$ ), tiene su misma masa y carga del mismo valor pero de signo +.

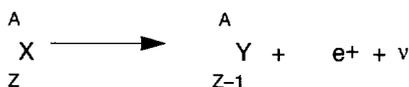
El espectro de energías de cualquier desintegración  $\beta$  es continuo, porque tiene todos los alores posibles desde 0 hasta un máximo característico de cada radionúclido (fig. 6). Para explicar este fenómeno, Fermi introdujo el concepto de **Neutrino**. Según este, en cada proceso de desintegración  $\beta$  se libera la misma energía, con un valor similar al máximo del espectro, repartiéndose aleatoriamente entre el electrón (o positrón) y el núcleo (energía de retroceso) y el neutrino (o antineutrino).

El neutrino sería una partícula sin masa y sin carga que posee la energía que "falta" en el espectro  $\beta^+$ . Cuando la energía de un  $e^+$  es 0, el neutrino se lleva casi toda su energía y cuando su energía es máxima, el neutrino la tienen despreciable.

El positrón procede de la conversión de un protón en un neutrón, con la emisión simultánea de un neutrino.



La desintegración  $\beta^+$  ocasiona la pérdida de un protón y la adquisición de un neutrón por parte del radionúclido que la sufre, descendiendo su Z en 1 unidad y permaneciendo su A inalterada.



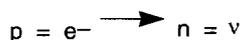
X se ha convertido en Y descendiendo un lugar en la tabla periódica y emitiendo una radiación  $\beta$  positiva de Energía Máxima característica.

Serán emisores  $\beta^+$  aquellos radionúclidos que necesiten perder protones para ganar estabilidad nuclear (poseen un "exceso" de protones).

Las partículas  $\beta^+$ , una vez perdida su energía cinética, son inestables y tienden a unirse a algún  $e^-$  formando energía gamma, fenómeno denominado **Aniquilación de Positrones**.

La radiación  $\beta$ , al no poseer masa apreciable, tiene una menor capacidad para interaccionar con la materia, penetrando más profundamente en esta (en los tejidos unos 15 mm.).

**2.4.4. CAPTURA ELECTRONICA:** Cuando un núcleo captura un electrón de las órbitas más próximas (K o L), se produce la siguiente reacción:



El electrón se une a un protón para producir un neutrón con la emisión de un neutrino. Es pues un proceso con las mismas consecuencias que la emisión  $\beta^+$ .



En la capa K (o L) se produce un hueco al que acude un  $e^-$  de una capa más externa, produciéndose la emisión de energía que acompaña a todo descenso. Todo proceso de aptura electrónica determina, por este mecanismo, una emisión electromagnética característica en la banda de los Rayos X.

**2.4.5. EMISION DE NEUTRONES:** Si un núcleo emite un neutrón, permaneciendo invariable su Z, su A desciende en una unidad y por lo tanto se convierte en un Isótopo.



Se emite una energía de pequeño valor, escasa penetrabilidad y espectro discontinuo.

**2.4.6. TRANSICION ISOMERICA:** Como ya comentamos, el núclido excitado que permanece en esta situación durante el tiempo suficiente, se denomina **Metaestable** y los

núclidos del mismo isótopo metaestable son isómeros entre sí.

La transición del estado excitado metaestable al estado fundamental (estable), se acompaña de la emisión de energía en forma de radiación gamma.

La energía de la radiación depende de los niveles energéticos de las capas electrónicas implicadas en el "salto", como ya vimos. Por lo tanto el espectro energético tendrá unos valores muy concretos en cada caso, será discontinuo.

**2.4.7. CONVERSION INTERNA:** Algunos núcleos pesados, con exceso de energía, pueden ceder parte de esta a un electrón próximo, para desplazarle de su órbita (K o L) y movilizarle en forma de radiación auténticamente electrónica, el "hueco" dejado en la capa inferior es ocupado por algún electrón externo con la consiguiente emisión de energía en forma de radiación electromagnética X.

Esta radiación electrónica cortical, a diferencia de la emisión  $\beta$  (nuclear), tiene un espectro discontinuo.

#### BIBLIOGRAFIA

1. Chandra, R.: Introductory Physics of Nuclear Medicine, Third Edition. Lea & Febiger, Philadelphia, 1987.
2. Zaragoza, J.R.: Física e Instrumentación Médica, Segunda Edición. Ediciones Científico Técnicas, Barcelona, 1992.
3. Forum Atómico Español: El libro de la Energía. Segunda Edición. FAE, Madrid, 1990.
4. Kane, J.W. y Sternhein, M.M.: Física, Segunda Edición. Ed. Reverté S.A., Barcelona, 1989.
5. Giancoli, Douglas C.: Física General. Prentice Hall Hispanoamericana S.A., México, 1988.
6. Hay, G. A. & Hughes, D.: First-Year Physics for Radiographers. Baillière Tindall, London, 1975.

