



## INTRODUCCIÓN AL ESTUDIO DE LAS RADIACIONES NUCLEARES

Ing. Cecilio Duarte Alaniz  
Facultad de Ciencias  
Universidad Autónoma del Estado de México.  
Unidad Académica el Cerrillo, Piedras Blancas, A.P. 2-139, C.P. 50000.  
Toluca Estado de México.  
[cedual@yahoo.com.mx](mailto:cedual@yahoo.com.mx)

### Radiación nuclear

La *radiación nuclear* está constituida por partículas cargadas eléctricamente o por ondas electromagnéticas características, emitidas desde un núcleo inestable o radiactivo de un átomo. Al proceso de emisión de la radiación nuclear se le conoce como *decaimiento radiactivo* del núcleo inestable y en éste, el núcleo pierde masa y/o energía, y se convierte en un núcleo de otro elemento que puede ser radiactivo o no. El proceso de decaimiento sigue una ley determinada, es espontáneo, al azar e independiente de factores físicos y químicos. A los átomos que presentan núcleos radiactivos se les denomina *radisótopos*. A los núcleos radiactivos se les llama *radionúclidos* [2].

### Notación de núclidos

Un *núclido* es una especie nuclear caracterizada por su número de masa (A), su número atómico (Z) y su número de neutrones (N). Una forma simple de indicar las características de cada núclido, consiste en colocar el A a la izquierda-arriba del símbolo del elemento en cuestión y a la izquierda-abajo el Z, el N ya no se indica pues es la diferencia entre el A y el Z, es decir,  $N=A-Z$ . Por ejemplo el elemento X, de número de masa A y de número atómico Z, se anota  ${}^A_Z X$  [2].

### Clasificación de isótopos

Los *isótopos* son átomos que poseen núclidos que tienen el mismo valor de Z pero diferentes valores de A y por lo tanto de N. Los *isóbaros* son átomos que poseen núclidos que tienen A iguales pero distintos Z y N. Los *isótonos* son átomos que poseen núclidos que presentan igual N pero diferentes A y Z.

### Decaimiento radiactivo

La radiactividad es entonces la existencia de radiación nuclear y se define como el número de núcleos que decaen emitiendo radiación nuclear en la unidad de tiempo como se muestra en la ecuación E-1, en la cual  $\lambda$  es la constante de decaimiento y tiene un valor particular para cada radisótopo [2].

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

Resolviendo la ecuación diferencial

$$\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt$$

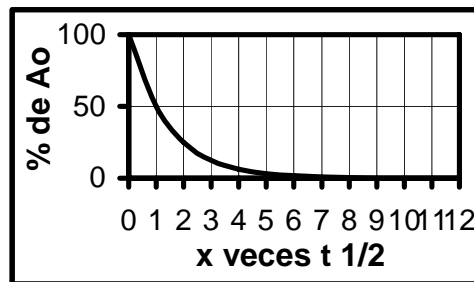
$$\ln(N/N_0) = -\lambda t$$

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

Al producto  $\lambda N$  se le denomina actividad A, así que

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (E-2)$$

E-2 se conoce como la ley de decaimiento radiactivo [2]. Por su naturaleza exponencial, se puede saber que transcurridas dos vidas medias la actividad inicial  $A_0$  se reduce a  $A_0/4$ , y luego de n vidas medias a  $A_0/2^n$ . La curva de decaimiento para cada radisótopo se obtiene al graficar t contra A, como se muestra en la figura 1.



**Figura 1.** Curva de decaimiento de cualquier radisótopo puro.

### Medición de la radiactividad

Para cuantificar la actividad se mide la cantidad de material radiactivo que se descompone por unidad de tiempo según la definición E-1. Así, definen las siguientes unidades [2].

- *Curie o Curio (Ci)*.- Cualquier cantidad de material radiactivo que sufre  $3.7 \times 10^{10}$  descomposiciones por segundo (dps), las cuales equivalen aproximadamente a la velocidad de decaimiento de 1g de radio.
- *Becquerel (bq)*.- Cualquier cantidad de material radiactivo que sufre 1 dps.

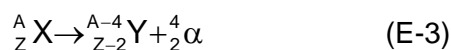
Entonces:  $1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{bq}$ .

### Tipos de radiación nuclear (modos de decaimiento radiactivo)

Existen tres modos de decaimiento radiactivo: alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) y decaimiento gama ( $\gamma$ ) [2].

#### Radiación $\alpha$

La radiación  $\alpha$  está constituida por núcleos de helio (dos neutrones y dos protones) y una carga eléctrica de 2+. Cuando un radionúclido emite una partícula  $\alpha$  se transforma en un núcleo de un elemento diferente (disminuye su número atómico en 4 unidades). Matemáticamente se expresa la emisión de una partícula  $\alpha$  por la ecuación E-3 [2].

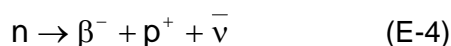


#### Radiación $\beta$

La radiación  $\beta$  es un electrón pero con carga de 1+ o 1-. A las partículas  $\beta$  con carga 1+ se les conoce como positrones o partículas  $\beta^+$ . A las partículas  $\beta$  con carga 1- se les conoce como negatrones o partículas  $\beta^-$  [2].

#### *Negatrón*

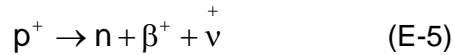
Un negatrón es emitido por un radionúclido al transformar un neutrón en protón (E-4). El número atómico aumenta una unidad y su masa es prácticamente la misma.



donde  $\bar{\nu}$  es un antineutrino (radiación de alta penetración, con masa despreciable y sin carga) [2].

#### Positrón

un positrón es emitido por un radionúclido cuando un protón se transforma en neutrón (E-5). El número atómico decrece una unidad.



donde  $\bar{\nu}$  es un neutrino (con características parecidas a las del antineutrino) [2].

#### Radiación $\gamma$

La radiación nuclear  $\gamma$  está constituida por ondas electromagnéticas similares a los rayos X, a la luz, o a las ondas de radio, pero con mucha mayor energía. Los rayos  $\gamma$  tienen energías bien definidas pues son productos de la transición de niveles de energía del núcleo. Cuando un núcleo emite un rayo  $\gamma$  conserva sus números de masa y de carga, pero cambia su nivel de energía, según la reacción nuclear representada por la ecuación E-6.



donde el núcleo resultante puede ser radiactivo o no [2].

#### Neutrones

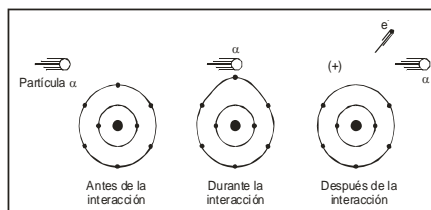
Los neutrones provienen de procesos de fisión espontánea de núcleos pesados, carecen de carga.

#### Interacción de la radiación nuclear con la materia

La ionización es el efecto básico de la radiación sobre la materia y depende del tipo de radiación y de su energía. Cuando la radiación incide sobre un electrón de los átomos que atraviesa, una cantidad de energía es transferida al electrón que sale disparado del átomo como ión negativo, el átomo permanece como ión positivo y así es originado un par iónico. La ionización específica de cualquier radiación se define como el número de pares formados por cada milímetro de trayectoria en un medio dado [1, 3, 4].

#### Efecto de las partículas $\alpha$ con la materia

Las partículas  $\alpha$ , son muy grandes y pesadas, por lo que al incidir en un electrón, lo despiden fuera del átomo sin modificar su trayectoria. El efecto de las partículas  $\alpha$  se ilustra en la figura 2.

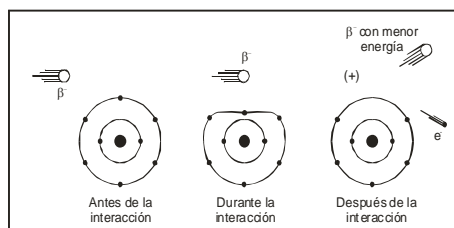


**Figura 2.** Efecto de las partículas  $\alpha$  en la materia.

La penetración (alcance o rango) de las partículas  $\alpha$  en la materia depende de la energía con que es emitida la partícula (perdiendo aproximadamente 32 eV por par iónico producido) y del medio en el que se desliza. En el aire una partícula  $\alpha$  de 4 MeV puede producir 120,000 iones y recorre una distancia aproximada de 2.54 cm antes de convertirse en un átomo de helio al combinarse con dos electrones libres [4]. Debido a su tamaño y a su carga, (2+), es casi imposible que una partícula  $\alpha$  llegue a chocar con un núcleo que también posee carga positiva que la repele [1, 4].

### Efecto de las partículas $\beta^-$ en la materia

Las partículas  $\beta^-$  tienen una sola carga negativa y al incidir sobre los electrones orbitales de los átomos los repele fuera de sus órbitas en lugar de atraerlos como las partículas  $\alpha$  [3, 13]. Este efecto se ilustra en la figura 3.

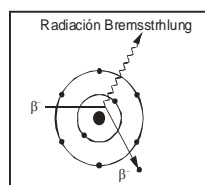


**Figura 3.** Efecto de las partículas  $\beta^-$  en la materia.

Las partículas  $\beta^-$  son mucho más pequeñas y ligeras que las  $\alpha$  y se mueven más rápidamente, por lo que causan una menor ionización específica y su penetración es mayor [4]. En el aire una partícula  $\beta^-$  de 4 MeV produce alrededor de 1,200 iones por cada 2.54 cm de recorrido. Para perder su energía ionizante, una partícula  $\beta^-$  debe recorrer 254 cm de aire, por lo que es 100 veces más penetrante que la  $\alpha$  [4]. Es muy difícil que una partícula  $\beta^-$  choque con un núcleo debido a que es repelida por los electrones que rodean a este, pues poseen también carga negativa [4].

### Radiación Bremsstrahlung

Es una radiación electromagnética que sucede cuando una partícula  $\beta^-$  pasa cerca de un núcleo y cambia su trayectoria y velocidad perdiendo energía. Este fenómeno se aprecia en la figura 4. La radiación Bremsstrahlung es similar a los rayos X y resulta más abundante cuando el material atravesado es de alto número atómico [4].

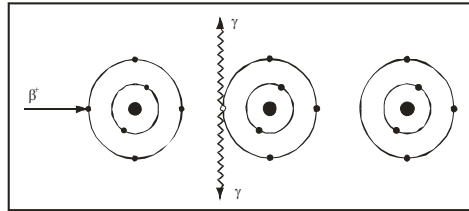


**Figura 4.** Radiación Bremsstrahlung.

### Efecto de las partículas $\beta^+$ en la materia

Estas partículas interactúan muy fácilmente con los electrones por tener diferencia de signos de carga, cuando se da esta interacción sucede lo que se llama *radiación de aniquilación*, que consiste en dos rayos  $\gamma$  de 0.51 MeV cada uno, en sentido contrario y

que se producen, cuando desaparece el positrón al mismo tiempo que el electrón con el que interactúa, es decir, se aniquilan [4]. Este efecto se ilustra en la figura 5.



**Figura 5.** Efecto de las partículas  $\beta^+$  en la materia.

### Efectos de la radiación $\gamma$ con la materia

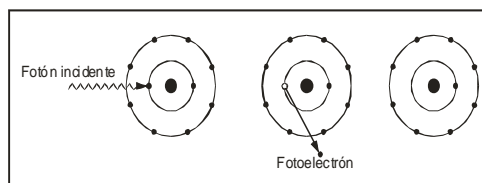
Las diferencias entre los rayos  $\gamma$  y los rayos X radica en que los primeros se originan en el núcleo y los segundos en los orbitales electrónicos del átomo; y en el orden de su energía, de keV a MeV y de cero a 50 keV, respectivamente. Ambas radiaciones tienen el mismo efecto en la materia sólo que unas disipan más energía que otras al ser absorbidas [4]. Tienen tres mecanismos de interacción con la materia que se describen a continuación y que se resumen en la tabla 1.

**Tabla 1.** Efectos de la radiación  $\gamma$  [4].

Efecto	Energía
Fotoeléctrico	<60 keV en Al <600 keV en Pb
Compton	60 keV – 1.5 MeV en Al 600 keV – 5 MeV en Pb
Producción de pares	>1.5 MeV en Al > 5 MeV en Pb

### Efecto fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico se presenta con radiaciones electromagnéticas de baja energía. El fotón es absorbido como paquete de energía, lo que ocasiona que un electrón, llamado fotoelectrón, sea lanzado fuera de una de las órbitas del átomo [4, 5]. como se ilustra en la figura 6.



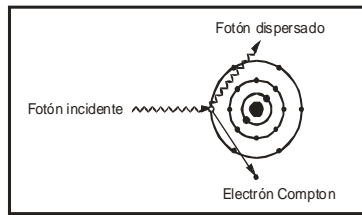
**Figura 6.** Efecto fotoeléctrico.

El fotoelectrón pierde energía produciendo pares iónicos. La vacante orbital es ocupada por otro electrón proveniente de órbitas exteriores de mayor nivel de energía, emitiéndose un rayo X de energía específica igual a la diferencia entre las energías de amarre de los electrones de ambos niveles. Si en lugar de emitir un rayo X la energía

se transmite a otro electrón más cercano al núcleo con menor nivel de energía, este es lanzado como electrón Auger [4, 5].

### Efecto Compton

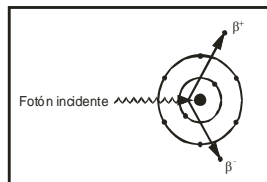
En este caso el rayo  $\gamma$  es de mayor energía y no se absorbe completamente en la colisión. Causa el lanzamiento de un electrón, desvía su trayectoria y la continúa con menor energía, mayor longitud de onda y en consecuencia menor frecuencia, con mayor probabilidad de incidir en otros electrones [4, 5]. Este efecto se ilustra en la figura 7,



**Figura 7.** Efecto Compton.

### Producción de pares

Al ser absorbido por la materia un rayo  $\gamma$  de alta energía se transforma en masa y produce un positrón ( $\beta^+$ ) y un negatrón ( $\beta^-$ ). La energía equivalente a las dos masas es  $2 \times 0.51 = 1.02$  MeV. Si la energía del rayo  $\gamma$  es mayor a ésta, la restante aparecerá como energía cinética del par formado [4, 5]. Este fenómeno se ilustra en la figura 8.



**Figura 8.** Producción de pares

### Efecto de los neutrones en la materia

Al no ser acelerados por campos eléctricos o magnéticos cuando se aproximan a núcleos atómicos su efecto en la materia es principalmente por medio de dos tipos reacciones nucleares que se conocen como *dispersión* y *absorción* [1]. La *dispersión* sucede cuando un neutrón es rebotado al chocar con el núcleo, y pierde energía. La *absorción* se presenta cuando un neutrón es absorbido por el núcleo al chocar con éste, lo que puede producir dos fenómenos, uno es de captura y el otro es de fisión [1]. El tipo de reacción nuclear con neutrones depende de la energía de éstos, según la cual se les clasifica básicamente como se muestra en la tabla 2 [1], y del núcleo con el que interactúan

**Tabla 2.** Clasificación de los neutrones por sus energía <sup>(11)</sup>.

Tipo de neutrón	Energía
Rápido	> 1 MeV
Intermedio	1 eV – 1 MeV
Térmico	0.025 eV – 1 eV

### Reacciones nucleares

Una reacción nuclear es el proceso por el cual un núcleo blanco interacciona con un núcleo proyectil, una partícula elemental o con un rayo  $\gamma$ , para producir un núcleo compuesto, que existe un tiempo del orden de  $10^{-14}$  segundos. Para estabilizarse el núcleo, emite rayos  $\gamma$  y partículas cargadas, transformándose en nuevo núcleo que generalmente es radiactivo [4]. El producto de una reacción nuclear depende del blanco, del proyectil y su energía.

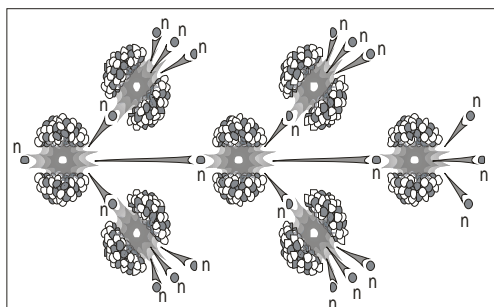
La notación usada para las reacciones nucleares es análoga a la usada en las reacciones químicas, con los reactivos a la izquierda y los productos a la derecha de la ecuación. También se usa una notación abreviada que consiste en escribir el medio usado de irradiación, una coma, y la partícula o rayo  $\gamma$  emitido por el núcleo compuesto adentro de un paréntesis colocado entre el núcleo blanco y el núcleo producto. Los símbolos n, p, d,  $\alpha$ , e,  $\gamma$ , x, designan en esta notación: neutrón, protón, deuterón, partícula  $\alpha$ , electrón, rayo  $\gamma$  y rayo X respectivamente. Así, la notación:  $^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O}$  representa a la reacción nuclear  $^{14}_7\text{N} + ^4_2\alpha \rightarrow ^{17}_8\text{O} + ^1_1\text{p}$ . En la cual el  $^{14}_7\text{N}$  es el núcleo blanco irradiado con partículas  $\alpha$ , produciéndose un oxígeno 17 y un protón [1]. Las principales reacciones nucleares con neutrones se resumen en la tabla 3 [1].

### Fisión nuclear

En la fisión, el núcleo (generalmente pesado) que absorbe un neutrón, se divide en dos núcleos de masas aproximadamente iguales liberando dos o tres neutrones en promedio y una gran cantidad de energía (alrededor de 200 MeV). Llamados fragmentos de fisión, estos núcleos resultantes, en general, son altamente radiactivos [1]. Esta reacción se representa como (n,f) [1]. Cuando el núcleo fisionable está rodeado de otros similares se da una reacción en cadena con los neutrones de la fisión inicial como se muestra en la figura 9, la cual es el principio en el que se basa las bombas atómicas y los reactores nucleares, solo que en los reactores nucleares se controla esta reacción.

**Tabla 3.** Principales reacciones nucleares con neutrones en función de su energía y de la masa del núcleo blanco [1].

Energía del neutrón	Núcleos blancos	
	Ligeros $25 < A < 80$	Pesados $80 < A < 240$
0 – 1 keV	(n,n) (n, $\gamma$ )	(n, $\gamma$ ) (n,n)
1-500 keV	(n,n) (n, $\gamma$ )	(n,n) (n, $\gamma$ )
0.5-10 MeV	(n,n) (n,n') (n,p) (n, $\alpha$ )	(n,n) (n,n') (n,p) (n, $\alpha$ ) (n, $\gamma$ )
10-50 MeV	(n,2n) (n,n') (n,n) (n,p) (n,np) (n,2p) (n, $\alpha$ )	(n,2n) (n,n') (n,n) (n,p) (n,np) (n,2p) (n, $\alpha$ )



**Figura 9.** Reacción en cadena de fisión de  $^{235}\text{U}$ .

La fusión nuclear consiste en unir núcleos pequeños para "construir" un núcleo más grande. Por ejemplo, un átomo de deuterio y otro de tritio (dos tipos de átomos de hidrógeno) se combinan para formar un átomo de helio, y queda un neutrón independiente.

El interés de la fusión nuclear se debe principalmente a que el proceso emite una menor radiación dañina para el ser humano. Sin embargo, hasta ahora no se ha logrado producir una fusión controlada, que permita aprovechar la energía.

### Radiotrazadores

La mayoría de los fenómenos que se verifican en la naturaleza y de los procesos que se realizan en los laboratorios y en la industria, están basados en el movimiento de los átomos y de las moléculas. Para el estudio de estos procesos se necesita conocer los cambios de posición de los átomos y de las moléculas. En estos casos se usa una mezcla de moléculas de átomos estables que arrastran a los átomos radiactivos, o, moléculas marcadas con átomos radiactivos. Estas moléculas marcadas, a pesar de ser radiactivas son afectadas por el proceso de la misma forma que las que no están marcadas y gracias a la radiación que emiten son detectadas fácilmente en tiempo real permitiendo así conocer la trayectoria del elemento estudiado en determinado proceso químico, físico o biológico. A estas moléculas marcadas se les conoce como trazadoras o radiotrazadoras y su utilidad depende del tipo de radiación que emiten, de la energía de ésta y del proceso que se ha de estudiar con ellos [1, 2].

### Fuentes consultadas.

- [1] Bulbulian S. 1982. "La radiactividad y algunas de sus aplicaciones ". Cuadernos del ININ, serie de divulgación general Méx., D.F., Méx.
- [2] Cecilio Duarte Alaniz. "Diseño y construcción de un prototipo para la obtención de  $^{32}\text{P}$ " Junio 2003. Tesis de Lic. Instituto Tecnológico de Toluca. Toluca México.
- [1] Iturbe G. José Luis. 2001. "Fundamentos de Radioquímica". Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca Edo. de Méx., Méx.
- [2] Navarrete M. Cabrera L. 1993. "Introducción al estudio de los radioisótopos" 2ª Ed. UNAM, Facultad de química, sección nuclear departamento. de química orgánica y nuclear Méx. D.F.,Méx.
- [5] Sánchez O. y de la Torre O. 1991. "Efectos químicos producidos por la radiación ionizante". INVESTIGACIÓN MÁS DESARROLLO, revista técnica del SUTIN. No. 0, Nov. SUTIN Méx., D.F., Méx.