

# APLICACIONES DE LA ENERGIA NUCLEAR

*José Luis Iturbe García*

Depto. de Química, ININ, Km. 36.5 Carr. México-Toluca, 52042, Edo. de México

## 1. RESUMEN

Con el descubrimiento de la radioactividad natural hace más de un siglo, se ha llegado a su utilización en la actualidad con fines prácticos en muchas ramas de la ciencia y la industria. Gracias a los radioisótopos se han podido conocer eventos de suma importancia, partiendo de la química pura, pasando por una gama de dominios muy variados incluyendo la Química aplicada. Algunos ejemplos de aplicaciones prácticas son: mecanismos de reacción utilizando isótopos radiactivos en reacciones químicas difíciles de realizar por otros métodos. El empleo de isótopos radiactivos en química analítica es particularmente fructífero, permite controlar los métodos clásicos, mejorarlos y ofrece nuevas posibilidades de análisis. En ciencias geológicas se pudo conocer la edad del planeta Tierra mediante los isótopos de plomo. En arqueología se puede conocer el pasado más próximo, mediante el método de plomo y helio permite determinar edades de minerales de varios miles de millones de años o pueden explorarse los últimos 10,000 a 20,000 años con un reloj arqueológico e histórico: el  $^{14}\text{C}$ . En biología vegetal, las plantas verdes asimilan gas carbónico del aire y liberan oxígeno, mediante el marcado del agua o del  $\text{CO}_2$  se ha confirmado de dónde proviene el oxígeno liberado por las plantas. En la medicina nuclear que estudia el comportamiento de compuestos radiactivos en el organismo humano, usándolos como trazadores, con propósitos de diagnóstico o bien con fines terapéuticos. En la irradiación de alimentos, sin que ello entrañe ningún riesgo para el medio ambiente o a la salud humana. Aplicación de la radiación gamma para erradicación de algunos tipos de insectos. En la industria de la vulcanización, esta tecnología denominada vulcanización por irradiación del látex del caucho natural, se basa en el uso de rayos gamma de alta energía (o también haces de electrones) para iniciar la vulcanización, con esto se sustituye el proceso basado en el uso de azufre, evitando así que se produzcan compuestos carcinógenos entre otras ventajas. Energía nuclear fuente de electricidad, la principal aplicación pacífica de la energía nuclear es, sin duda la producción de electricidad. Estas son algunas de las muchas aplicaciones que se pueden aprovechar de los isótopos radiactivos para beneficio de la humanidad.

Descubrimiento de la radiactividad

Leucipides (445 ac) límite a la división de cuerpos y enunció por primera vez la palabra átomo.

Demócrito (427 ac) consideraba al ser como un todo formado por una infinidad de átomos. Materia formada por partículas muy pequeñas que eran indivisibles, indestructibles e invisibles.

Epícuro (278 ac) atribuyó el nacimiento del mundo a una violenta concentración de átomos.

Aristóteles (384-322 ac) materia formada por sustancias básicas llamados elementos: fuego, aire, tierra y agua que a diferencia de los átomos sí se podía ver, tocar y sentir, ideas por casi 2000 años.

Perre Gassendi a mediados del siglo XVII pensó nuevamente en los átomos.

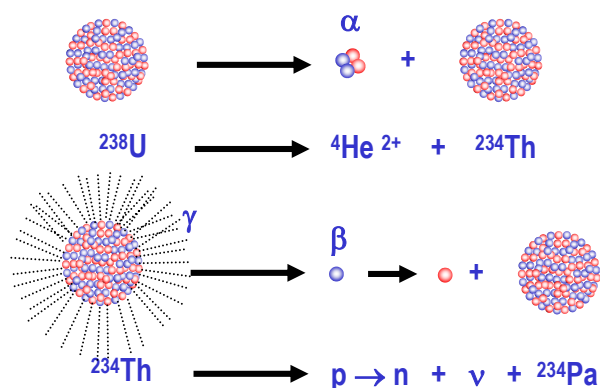
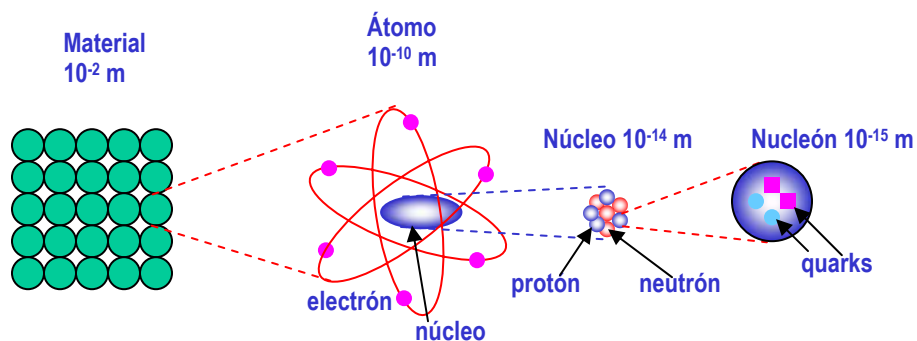
1895 físico alemán Wilhelm Conrad Röntgen descubrió los rayos x experimentando con un tubo de rayos catódicos.

Henry Becquerel en 1896 descubre que a partir de una sal de uranio (sulfato de uranil potasio) se emitían radiaciones capaces de velar placas fotográficas envueltas en papel negro.

Pierre y Marie Curie en 1898 concluyeron que la radiación proveniente del uranio era un fenómeno de carácter atómico, no estaba relacionado ni con el estado físico, ni químico y le dieron el nombre de radiactividad

En 1932 J. Chadwick descubre el neutrón.

## ESTRUCTURA DE LA MATERIA Y TIPOS DE RADIACIONES



Nombre	Carga	Masa (uma)	Velocidad relativa a la luz	Penetración relativa	Ionización relativa	Descripción
Partícula $\alpha$	2+	4	5%	1	10,000	Ion $4\text{He}^{++}$
Partícula $\beta$	$\pm 1$	0.0055	95%	100	100	Electrones
Radiación $\gamma$	0	0	100%	10,000	1	Radiación electromagnética

## REACCIONES NUCLEARES

Principal protagonista: el neutrón

Símbolo: n; Z = 0; A = 1; m = 1.0086654 uma

Reacción (N, x) → (núcleo compuesto) inestable se desexcita 10<sup>-12</sup> a 10<sup>-16</sup> s

Dispersión elástica se representa (n, n)

Dispersión inelástica ec del n y del núcleo no se conservan y puede ser radiactivo

Reacciones nucleares (n,x) partícula emitida (los núcleos formados difieren del original)

La reacción nuclear cambios o transformaciones inducidos en los núcleos por partículas nucleares

(n, p, d, α, núcleos pesados, <sup>6</sup>Li, <sup>12</sup>C, <sup>22</sup>Ne, etcétera)

$A + x \rightarrow B + y + Q$

A(x, y) B

Se clasifican en tres grupos según el proyectil

Reacciones con neutrones, partículas cargadas y reacciones con fotones

## REACCIONES CON NEUTRONES

Reacciones (n, γ) más probables a bajas energías (0.025 eV)

Con energías de 2 a 3 MeV reacciones tipo (n,p), (n, α)

<sup>23</sup>Na (n, γ) <sup>24</sup>Na (t 1/2 = 15 h); <sup>44</sup>Ca (n, γ) <sup>45</sup>Ca (t 1/2 = 165 d)

<sup>56</sup>Fe(n, p) <sup>56</sup>Mn (t 1/2 = 2.58 h); <sup>75</sup>Ge (n, α) <sup>72</sup>Zn (t 1/2 = 49 h)

Aplicación al análisis

Reactor nuclear de investigación

Elemento a cuantificar (SIFCA, SINCA, TUBO SECO)

método por comparación

Donde

W<sub>m</sub> = concentración del elemento en la muestra

W<sub>p</sub> = concentración del elemento en el patrón

A<sub>m</sub> = actividad del elemento en la muestra

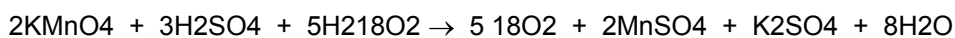
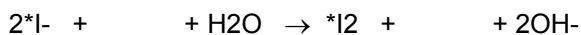
A<sub>p</sub> = actividad del patrón

Límites de detección de elementos irradiados en un reactor nuclear dependiendo de: tiempo de irradiación, posición, sección eficaz, concentración, ...

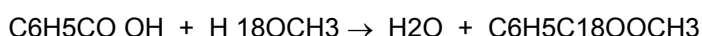
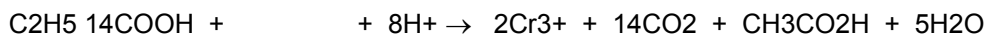
EJEMPLO: Flujo 1013 neutrones térmicos, una hora de irradiación

Límites de detección (μg)	Elementos
1-3x10 <sup>-6</sup>	Dy
4-5x10 <sup>-6</sup>	Mn
1-3x10 <sup>-5</sup>	Kr, Rh, In, Eu, Ho, Lu
4-5x10 <sup>-5</sup>	V, Ag, Cs, Sm, Hf, Ir, Au
1-3x10 <sup>-4</sup>	Sc, Br, Y, Ba, W, Re, Os, U
4-9x10 <sup>-4</sup>	Na, Al, Cu, Ga, As, Sr, Pd, I, La, Er
1-3x10 <sup>-3</sup>	Co, Ge, Nb, Ru, Cd, Sb, Te, Xe, Nd, Yb, Pt, Hg
4-9x10 <sup>-3</sup>	Ar, Mo, Pr, Gd
1-3x10 <sup>-2</sup>	Mg, Cl, Ti, Zn, Se, Sn, Ce, Tm, Ta, Th
4-9x10 <sup>-2</sup>	K, Ni, Rb
1-3x10 <sup>-1</sup>	F, In, Ca, Cr, Zr, Tb
10-30	Si, S, Fe

Química: estudios en mecanismos de reacción



Química orgánica



Fecha por medio del decaimiento radiactivo

estimar edades absolutas de rocas y minerales mediante el decaimiento radiactivo

$$t_{1/2} = 4.51 \times 10^9 \text{ años}$$

Las relaciones de masa menores a 0.866 muestran que las rocas tienen menos de  $4.51 \times 10^9$  años de edad.

$$t_{1/2} = 1.2 \times 10^9 \text{ años MEDIANTE ESPECTROMETRO DE MASAS}$$

MÉTODO DEL  $^{14}C$

$N = N_0 e^{-\lambda t}$  A DE  $^{14}C$  a la mitad después de 5730 años (15.3 dpm y por gramo)

MÉTODO	$T_{1/2}$ (años)	INTERVALO DE TIEMPO	MATERIALES DATABLES
$^{238}U/^{206}Pb$	$4.5 \times 10^9$	A partir de $10^7$ años, hasta la edad de la tierra	Uraninita, pitchblenda; monacita; lava, rocas sedimentarias, ígneas y metamórficas
$^{40}K/^{40}Ar$	$1.31 \times 10^9$	De 105 años hasta la edad de la tierra	Algunas rocas y minerales con potasio, rocas volcánicas, piedra pómez, ...
MUESTRA	EDAD CONOCIDA (años)	EDAD CON $^{14}C$ (años)	
Rollos del mar muerto	$2057 \pm 100$	$1917 \pm 200$	
Madera de la tumba del Faraón Sesostri III	3750	$3620 \pm 180$	

Algunos radioelementos utilizados en medicina nuclear (diagnóstico y terapia)

NÚCLIDO	USOS
131I	CURAR HIPERTIROIDISMO, CÁNCER DE TIROIDES
32P	TERAPIA DE POLIGLOBULINA
198Au	COLOIDES EN LA TERAPIA DE TUMORES
238Pu	FUENTE DE ENERGÍA (estimuladores cardiacos)
199mTc	MARCADO (anticuerpos monoclonales)
90Sr ; 32P	TRATAMIENTO CÁNCER DE PIEL
60Co 67Ga	RADIOTERAPIA (destrucción de tumores) DETECCIÓN DE TUMORES DEL PULMÓN

Arte de ver: nuevas técnicas de radiografía  
Diagnóstico de enfermedades

Imágenes internas del cuerpo humano con radiación del sincrotrón  
Se obtienen imágenes radiográficas por contraste de fase de gran calidad  
Dosis de radiación menores a las convencionales  
Tomografía por emisión de positrones (pet) medicina nuclear molecular  
Producir elementos radiactivos que emiten positrones (ciclotrón)  
Marcado del fármaco; administración; escáner pet  
Reconstrucción e interpretación de la imagen  
Obtención de imágenes bi y tridimensionales (diagnosticar tumores cerebrales, epilepsia, apoplejía, demencia)  
Distribución de moléculas radiactivas dentro del cuerpo humano  
Algunas virtudes de pet  
Mide flujo sanguíneo, metabolismo de oxígeno, síntesis de proteínas  
Actividad enzimática, metabolismo de glucosa, caracteriza enfermedades a nivel molecular

Radionúclido	Vida media (min)	Energía (MeV)	Alcance promedio en agua (mm)
11C	20.4	0.39	1.1
13N	9.96	0.49	1.5
15O	2.05	0.74	2.5
18F	109.8	0.25	0.6

## IRRADIACIÓN DE ALIMENTOS

Ciertos radioelementos se emplean agentes de irradiación externa (60Co, 137Cs, generadores de radiación gamma, rayos x, electrones)

Creciente demanda de alimentos inocuos

La tecnología de las radiaciones constituye una respuesta oportuna

Enfermedades transmitidas por alimentos (cada año hay en todo el mundo 4000 millones de casos de diarrea)

Alimentos contaminados con una o varias bacterias patógenas, como (salmonella, campylobacter, yersinia, listeria, shigella, vibrio, e. Coli, ...)

Cada año intoxicaciones alimentarias (5000 fallecimientos, 325,000 pacientes hospitalizados, 76 millones de personas enfermas)

Aplicaciones comerciales de la irradiación de alimentos

Más de 40 países ya han aprobado la utilización de la irradiación de alimentos y más de 30 para fines comerciales

Volumen total de alimentos ha aumentado significativamente en los últimos años (cifra estimada 250,000 toneladas anuales)

Alimentos irradiados principalmente (especias, condimentos de origen vegetal secos, frutas, productos cárnicos,...)

Con esta técnica se garantiza su inocuidad microbiológica

Aplicación de la radiación gamma a insectos

Técnica de insectos estériles, para erradicar al gusano barrenador

La esterilidad sexual se logra exponiendo al insecto a los rayos gamma durante su fase larval avanzada.

Los insectos estériles al aparearse con hembras naturales, los huevos al depositarse en heridas de animales no maduran.

Con este proceso se logra que no haya descendencia

La erradicación se realiza en tiempos cortos

Sueltas sostenidas en proporción de entre 10 a 15 insectos estériles por uno natural por varias generaciones.

En México existe una instalación, chiapa de corso Fundada en 1976

Producción: 15 millones de moscas semanalmente

Lucha contra los mosquitos que transmiten el paludismo (anofeles)

Paludismo enfermedad más importante transmitida por insectos

300 – 500 millones de casos clínicos de paludismo cada año

Dos millones de muertes anualmente (90% en África, principalmente niños)

Irradiación del latex de caucho natural

Vulcanización por irradiación (rayos gamma de alta energía, haces de electrones)

Se logra mayor elasticidad y resistencia al caucho

Ventajas: evita el uso de azufre, no origina residuos tóxicos (ditiocarbamato, aditivo tóxico, nitrosoaminas productos cancerígenos,...)

Sensibilizador a las radiaciones: acrilato n-butílico (cinco partes por 100)

Reducción de la dosis de 30-40 kgy a 12 kgy

Elevada transparencia y suavidad

Producción de energía eléctrica

Necesidades futuras de energía (crecimiento demográfico, salud y medio ambiente)

La electricidad se produce recuperando en forma de calor, la energía nuclear liberada por la reacción de fusión

Funcionamiento de una central nucleoelectrónica (reactor nuclear)

Parecido al de una central termoeléctrica convencional (caldera)

Combustible ( u-natural, u-enriquecido en  $^{235}\text{u}$ ,  $^{239}\text{pu}$ ,  $^{233}\text{u}$ ,...)

Moderador ( frenar los neutrones de 20,000 km/s a 2 km/s), grafito, agua pesada, agua ordinaria, materiales formados por núcleos ligeros.

Refrigerante: (transferencia de calor) gas carbónico, helio, agua ordinaria, agua pesada, metales líquidos, líquidos orgánicos

Control del reactor: barras de control, absorben neutrones (boro, cadmio,...)

El vapor se transforma en movimiento de una turbina y después, el giro del eje de la turbina se transmite a un generador que produce energía eléctrica.

Por cada planta nuclear de 1000 mwe se evita la emisión a la atmósfera de:

6.5 millones de t  $\text{CO}_2$ ; 900 de  $\text{SO}_2$ ; 4,500 de  $\text{NO}_x$ ; 320,000 de cenizas; 400 de metales pesados tóxicos

Situación de la energía nucleoelectrónica en el mundo (2001)

Reactores en funcionamiento – 438 unidades

Mwe producidos – 351,327

En construcción – 31 unidades

Mwe previstos – 27,756

**PARTICIPACIÓN DE LA ENERGÍA NUCLEOELÉCTRICA EN LA GENERACIÓN DE ELECTRICIDAD**

PAÍS	(%)	PAÍS	(%)	PAÍS	(%)
FRANCIA	76.4	SUIZA	35.5	CANADÁ	11.8
LITUANIA	73.7	JAPÓN	33.8	RUMANIA	10.9
BÉLGICA	56.8	ARMENIA	33	ARGENTINA	7.3
ESLOVAQUIA	53.4	FINLANDIA	32.1	SUDÁFRICA	6.7
UCRANIA	47.3	ALEMANIA	30.6	PAÍSES BAJOS	4
BULGARIA	45	ESPAÑA	27.6	MÉXICO	3.9
HUNGRÍA	42.2	REINO UNIDO	21.9	INDIA	3.1
COREA	40.7	ESTADOS UNIDOS	19.8	PAKISTÁN	1.7
SUECIA	39	REP. CHECA	18.5	BRASIL	1.4
ESLOVENIA	37.4	RUSIA	14.9	CHINA	1.2