

Producción de Radionucleidos

ENR 2024

BASSIN DE VICHY
SOURCE
RADIUM
AUTORISÉE PAR L'ÉTAT

Inicio de "Era Nuclear"

NEWARK ADVOCATE FINAL EDITION
LIVING CHAIR'S (1934-1935) *Scientific Edition* Member of Standard Press

Doctors Say Radium Stops Agony Of Rheumatism
How the New Discovery ARADUM Stops the Mardian Power of Pain in Every Suffering Man and Woman.
\$5,000.00 Reward If They Fail



RADIUM v. GREY HAIR

Who'd dream she was 50?

50-and not a grey hair to be seen. Wonderful! Yet an absolute fact. Let 'CARADIUM' do for you what it has done for thousands of our clients in all parts of the world. 'CARADIUM' will quickly restore, right from the hair roots, the natural colour, health and beauty to your hair, making you look 10 to 20 years younger.

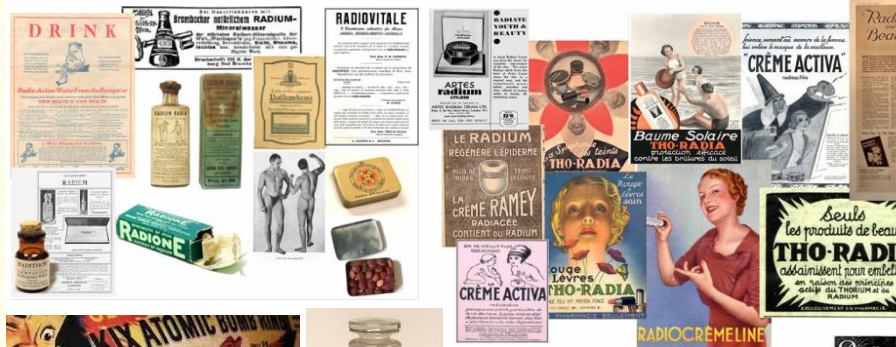
'Caradium' is NOT A DYE
CONTAINING RADIO-ACTIVE WATER.
Regular application of 'Caradium' will purify the colour glands of the hair and cause the natural pigment to flow afresh. 'Caradium' Restorer is just as efficacious in cases of premature or falling greyness or greyness caused by illness, worry or overwork. It is absolutely safe. So natural is the course of restoration that the use of 'Caradium' is absolutely undetectable.
Grey Hair will never appear if CARADIUM IS USED ONCE WEEKLY AS A TONIC Olive Oil Shampoo Powders. The finest in the world for producing Soft and Glossy hair, 6d. each. Packets of twelve, 8/-.
WARNING: Ask for Caradium Rest and see that you get it; imitations are used.

Caradium REGD. Large Size
4/- 7/6
* CARADIUM (REGD.) 28, Great Smith Street, Westminster, LONDON

Burkhardt RADIUM SCHOLOADE
MADE BY SCIENTIFIC CRISTOLOS, RADIOACTIVE & LUMINOUS
RADIUM

How to PROSPECT For ATOMIC MINERALS

World-wide race for radioactive minerals is on! New deposits in U.S. being found constantly. Thrilling opportunity. Tells how to find URANIUM, THORIUM, CARNOTITE, PITCHBLEND, etc. All needed in Atomic Research. Full instructions by mail only 25c. Tells...
How to Operate GEIGER COUNTER
Be among first to use famous Geiger Counter. Seeks out Radioactive Minerals. Own your own or rent for vacation. New Uranium deposits may be found in any state. Send 25c for instructions now. Supply limited.
OMAHA SCIENTIFIC SUPPLY
3623 Lake St. Dept. PS-2 Omaha 3, Nebr.





Danlos fue pionero en el uso de la radioactividad en el tratamiento del lupus eritematoso de la piel, y en **1901** con el físico **Eugène Bloch**, fueron los primeros en aplicar radio sobre las lesiones cutáneas de la tuberculosis.



C. Davis escribiera en el American Journal of Clinical Medicine que *“la radioactividad previene las enfermedades, aumenta las emociones nobles, retrasa el envejecimiento y genera una espléndida y juvenil vida”*.

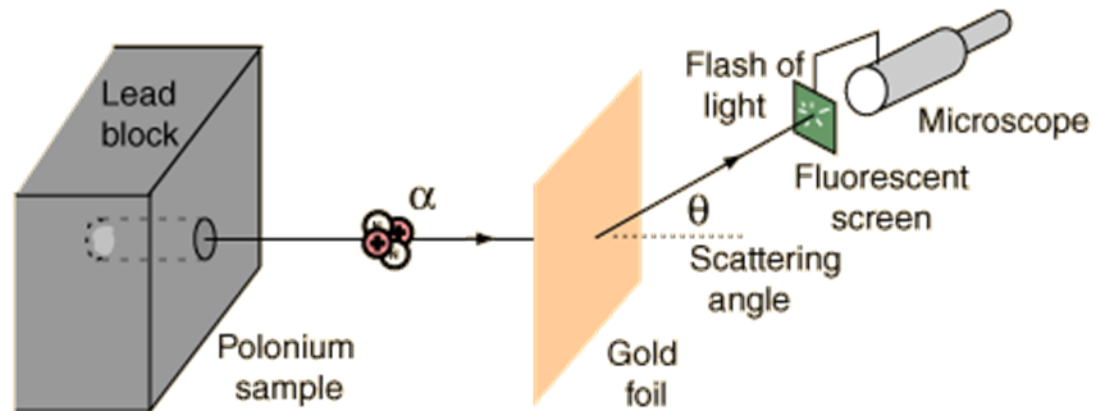
The first report of the internal use of radionuclides for cancer therapy emerged in **1913**, when **Frederick Proescher** used intravenous injections of soluble **radium-223** salts for the treatment of patients with a variety of diseases, including uterine cancer and leukemia.

Desde que **George Hevessy** (1885-1966), considerado el padre de la medicina nuclear, en el año **1932** realizó investigaciones con el empleo de trazadores para marcar alimentos y valorar la trayectoria de estos dentro de los diferentes organismos, incluido el ser humano

Producción de Radionucleidos

- 1896, radiactividad natural (H. Becquerel) y posteriores contribuciones de Pierre Curie and Marie Skłodowska Curie, E. Rutherford, and F. Soddy (1902) sobre otros muchos elementos radioactivos.
- Todos los elementos naturales con número atómico $Z > 83$ (bismuto) son radioactivos.
- Radioactividad artificial fue reportada por I. Curie and F. Joliot en 1934.

Al bombardear con partículas α , originadas en polonio, blancos de boro y aluminio observaron la emisión de positrones aún después de remover la fuente de partículas



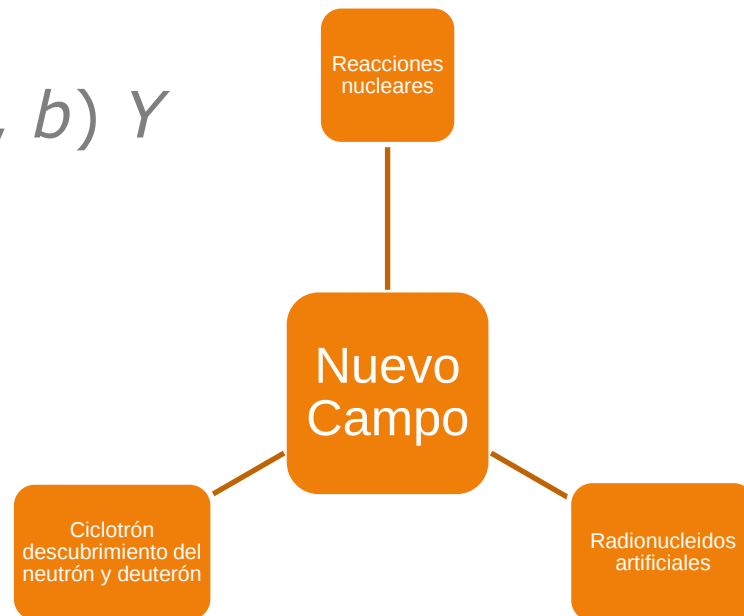
Producción de radionucleidos

Reacciones nucleares

El término reacción nuclear se aplica a una variedad de procesos que involucran colisiones entre núcleos.

En una reacción nuclear típica inciden núcleos (o partículas) a sobre núcleos blanco X .

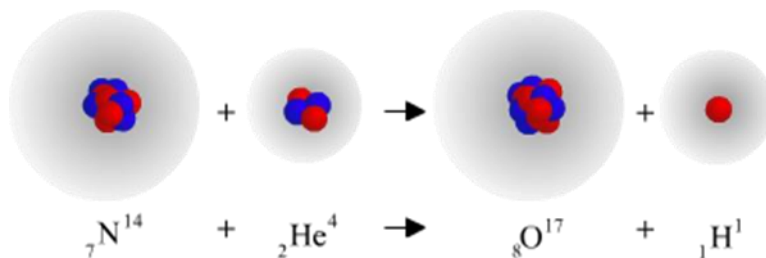
Los núcleos a y X interactúan a través de las fuerzas nucleares (y electromagnéticas) y producen nuevos núcleos b e Y .



Producción de Radionucleidos

- Más de 2700 radionucleidos producidos artificialmente en ciclotrón, reactores, generador de neutrones y acelerador lineal
- Radionucleidos usados en medicina nuclear son en su mayoría artificiales.
- El tipo de radionucleido producido depende de la partícula incidente, su energía y el núcleo blanco
- Estas facilidades son caras, limitadas y suministran radionucleidos a otros centros
- Radionucleidos de vida media muy corta son disponibles solo en las instituciones que posean dichas facilidades.
- Existen otro tipo de fuentes secundarias de radionucleidos, de vidas medias cortas, llamados *generadores de radionucleidos*.

Usualmente, tanto la partícula incidente **a** como la saliente **b** son nucleones o núcleos livianos (deuterones, α , etc.) mientras que **X** e **Y** son núcleos más pesados.



Sin embargo, también son habituales reacciones donde los proyectiles son más pesados



Reacciones nucleares: leyes de conservación

- ✓ Conservación de los nucleones, A
- ✓ Conservación de la carga, q
- ✓ Conservación de la energía (masa), E
- ✓ Conservación del momento lineal, p



Energía de reacción

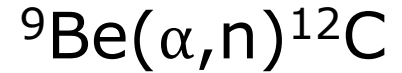
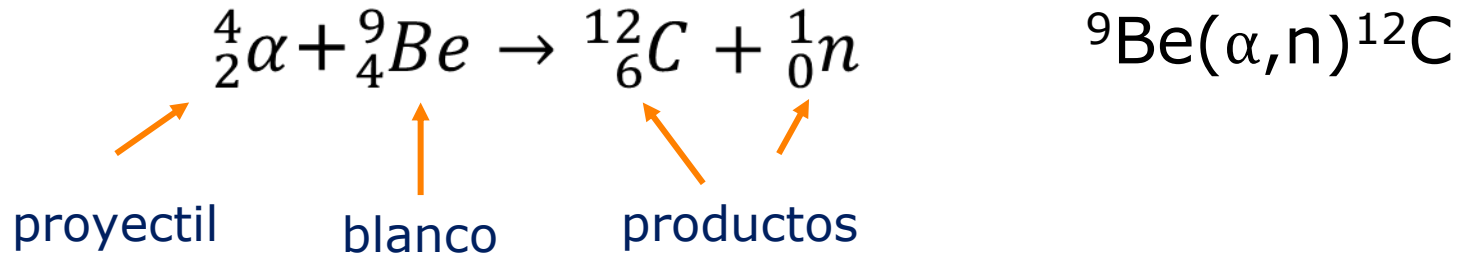
Si $Q > 0$ reacción exotérmica (exoérgica)  se convierte en energía cinética de los productos. Ocurre para todos los valores de la energía cinética del proyectil.

Si $Q < 0$ reacción endotérmica (endoérgica)  el proyectil debe tener una energía cinética mínima para producir la reacción.

Recordando $E=mc^2$

$$Q = (M_X + M_a - M_Y - M_b)c^2$$

Reacciones nucleares



Conservación de los nucleones:

$$\begin{aligned} Z_a + Z_x &= Z_b + Z_y & 2 + 4 &= 6 + 0 \\ N_a + N_x &= N_b + N_y & 2 + 5 &= 6 + 1 \end{aligned}$$

Conservación de la energía-masa

$$M_x c^2 + E_{cx} + M_a c^2 + E_{ca} = M_y c^2 + E_{cy} + M_b c^2 + E_{cb}$$

$$Q = E_{cfinal} - E_{cinicial} = (E_{cy} + E_{cb}) - (E_{cx} + E_{ca})$$

$$Q = (M_x + M_a - M_y - M_b) c^2$$

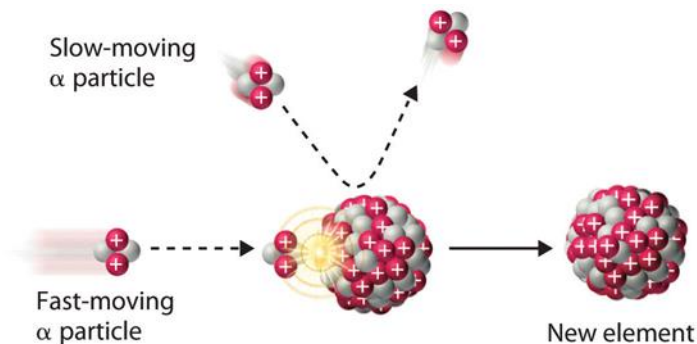
Energía umbral

De la conservación de momento lineal y la energía y siendo que Y y b salen con energía cinética cero en el sistema de referencia de laboratorio, la energía mínima del proyectil será:

$$E_{\text{cmin}} = -Q (M_X + M_a + M_Y + M_b)/2M_A$$

En el límite no relativista, se puede aproximar como:

$$E_{\text{cmin}} = - (1 + m_X/m_a) Q$$



Si las partículas incidente y saliente son las mismas, $X = Y$, el proceso se denomina dispersión

Dispersión elástica, donde Y queda en el mismo estado cuántico que el que estaba X  la energía cinética se conserva

- ❖ Interacción Coulombiana
- ❖ Interacción nuclear

$$x = y, X = Y, Q = 0$$

Dispersión inelástica donde Y queda en un estado distinto del que estaba X .

- ❖ partícula emitida igual o distinta al proyectil
- ❖ interacción con el blanco
- ❖ transferencia de energía directa

El Ciclotrón

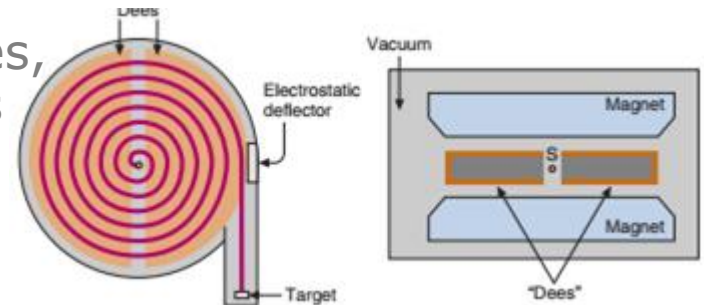
✓ Partículas cargadas (protones, deuterones, partículas α , ^3He) son aceleradas en órbitas circulares bajo vacío mediante un campo electromagnético

✓ Energías pocos keV a varios GeV, dependiendo del diseño y tipo de ciclotrón ($\alpha \sim 15\text{MeV}$).

✓ La partícula cargada al moverse en una órbita circular bajo un campo magnético incrementa gradualmente su energía cinética a medida que aumenta el radio de su trayectoria

✓ Esta relación entre energía cinética y el radio son conocidas para cada ciclotrón.

✓ Iones pesados como ^{16}O , ^{14}N y ^{32}S han sido exitosamente acelerados



$$\vec{F} = e\vec{B} \times \vec{v}$$

$$\frac{mv^2}{r} = Bev$$

$$r = \frac{mv}{Be}$$

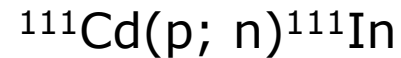
El Ciclotrón

- ✓ Cuando partículas aceleradas inciden sobre blancos de elementos estables pueden ocurrir reacciones nucleares.
- ✓ En esta reacción nuclear, la partícula incidente puede dejar parte de su energía en el núcleo o bien ser absorbida por el núcleo.
- ✓ Dependerá de la energía de la partícula incidente y la sección eficaz de la reacción.
- ✓ En ambos casos, se formará un núcleo en un estado excitado, el exceso de energía dará lugar a la emisión de nucleones, que es seguida por emisión de rayos gamma.
- ✓ Cada reacción nuclear para la producción de nucleidos tiene una energía umbral, Q , que es absorbida o liberada:

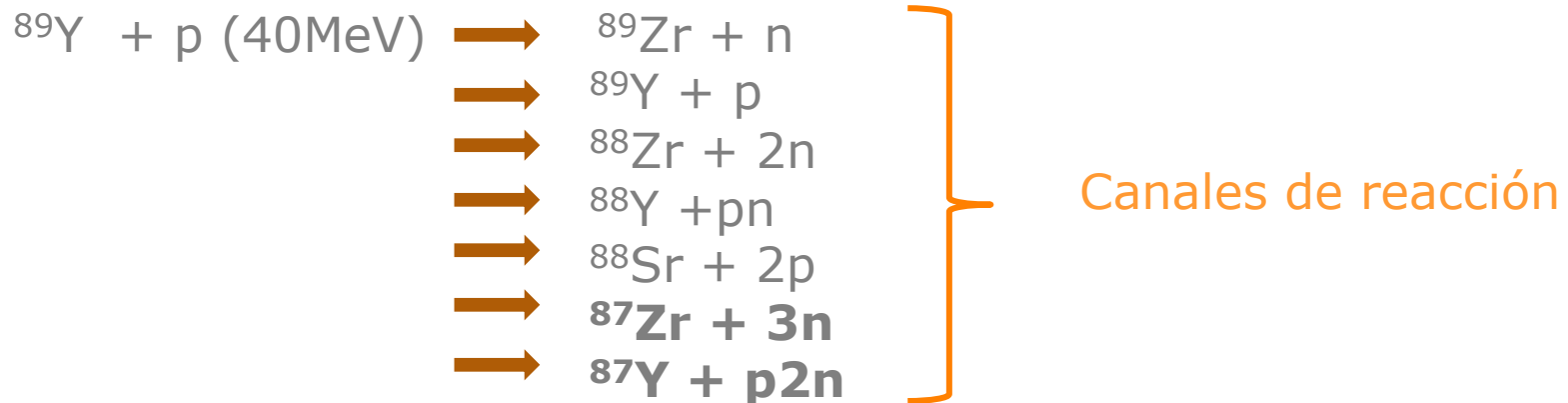
$$Q = M(\text{blanco}) + m_p - M(\text{producto}) - m_p^*$$

Ejemplos de radionucleidos producidos en un Ciclotrón

➤ irradiando ^{111}Cd con protones de 12-MeV $\longrightarrow$ ^{111}In



➤ ^{89}Y por irradiación con protones de 40-MeV



El Ciclotrón

- ✓ Radionucleidos producidos con números atómicos diferentes a isótopos del blanco, no contienen ningún isótopo estable (frio o portador). Se denomina libre de portador (carrier-free) o no carrier added (NCA),
- ✓ Los materiales blancos deben ser preferentemente puros o monoisotópicos o enriquecidos isotopicamente para evitar la producción de radionucleidos no deseados o extraños.
- ✓ Los ciclotrones tienen dos usos potenciales principales en el entorno de hospitales:
 - ✓ haces de neutrones y protones de alta energía para radioterapia
 - ✓ activación de materiales para trazadores o diagnóstico.
 - ✓ una máquina de hospital produce radioisotopos de vida media muy corta.

Ejemplos de radionucleidos producidos en un Ciclotrón

Galio-67

$^{66}\text{Zn}(\text{d}; \text{n})^{67}\text{Ga}$, $^{68}\text{Zn}(\text{p}, 2\text{n})^{67}\text{Ga}$, and $^{64}\text{Zn}(\alpha; \text{p})^{67}\text{Ga}$.

Zinc natural u óxido enriquecido irradiado con 20-MeV protones, 8-MeV deuterones, o 23-MeV partículas α . Posteriores procesos químicos hasta obtener citrato de galio.

Puede haber impurezas de ^{66}Ga ($T_{1/2}$ 9 hr) comparado con 78 hr de ^{67}Ga .

Iodo-123

Buenas características de radiación: decaimiento por CE, $T_{1/2} = 13.2$ hr y emisión de rayos gamma de 159 keV.

Métodos directos: $^{121}\text{Sb}(\alpha; 2\text{n})^{123}\text{I}$, $^{123}\text{Te}(\text{p}; \text{n})^{123}\text{I}$, $^{122}\text{Te}(\text{d}; \text{n})^{123}\text{I}$, y $^{124}\text{Te}(\text{p}; 2\text{n})^{123}\text{I}$. Posteriores procesos químicos. Contaminantes ^{124}I , ^{125}I

Métodos indirectos: ^{123}Xe se produce inicialmente y luego decae con $T_{1/2} = 2.1$ hr a ^{123}I . Libre de otros radioisótopos del I.

$^{122}\text{Te}(\alpha; 3\text{n})^{123}\text{Xe}$, α de 42-46 MeV, $^{122}\text{Te}({}^3\text{He}; 2\text{n})^{123}\text{Xe}$, ${}^3\text{He}$ de 20-30 MeV
 $^{123}\text{Te}({}^3\text{He}; 3\text{n})^{123}\text{Xe}$, ${}^3\text{He}$ de 25 MeV, $^{127}\text{I}(\text{p}; 5\text{n})^{123}\text{Xe}$, p de 60-70 MeV.

Radionucleidos de vida media corta

- ✓ Interés para disponibilidad en Positron Emission Tomography (PET)

^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , and ^{18}F ,

- ✓ Vidas medias muy cortas, ciclotrones médicos (CM) localizados en el laboratorio.
- ✓ Un CM es una versión pequeña de ciclotrón usado primariamente para la produccion de radionucleidos para aplicaciones médicas
- ✓ Provee partículas cargadas de baja energía y alta intensidad.
- ✓ Pueden acelerarse alternadamente deuterones y protones.

Ejemplos de radionucleidos de vida media corta

Carbón-11, $T_{1/2} = 20.4$ min,



Nitrógeno-13, $T_{1/2} = 10$ min, se usa como NH_3



Ambos para imagen de miocardio por PET

Oxígeno-15, $T_{1/2} = 2$ min,



Nomenclador de hemoglobina, investigaciones clínicas de malfunciones pulmonares o cardiacas, estudios de perfusión de miocardio cerebral

Fluor-18, $T_{1/2} = 10$ min,



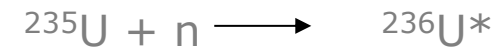
Nomenclar glucosa, (fluorodeoxyglucose (FDG)), estudios metabólicos cerebral y de miocardio, nomenclador de ligandos potenciales de tumores y para imágenes de huesos (U.S. Food and Drug Administration (FDA)).

Reactores nucleares

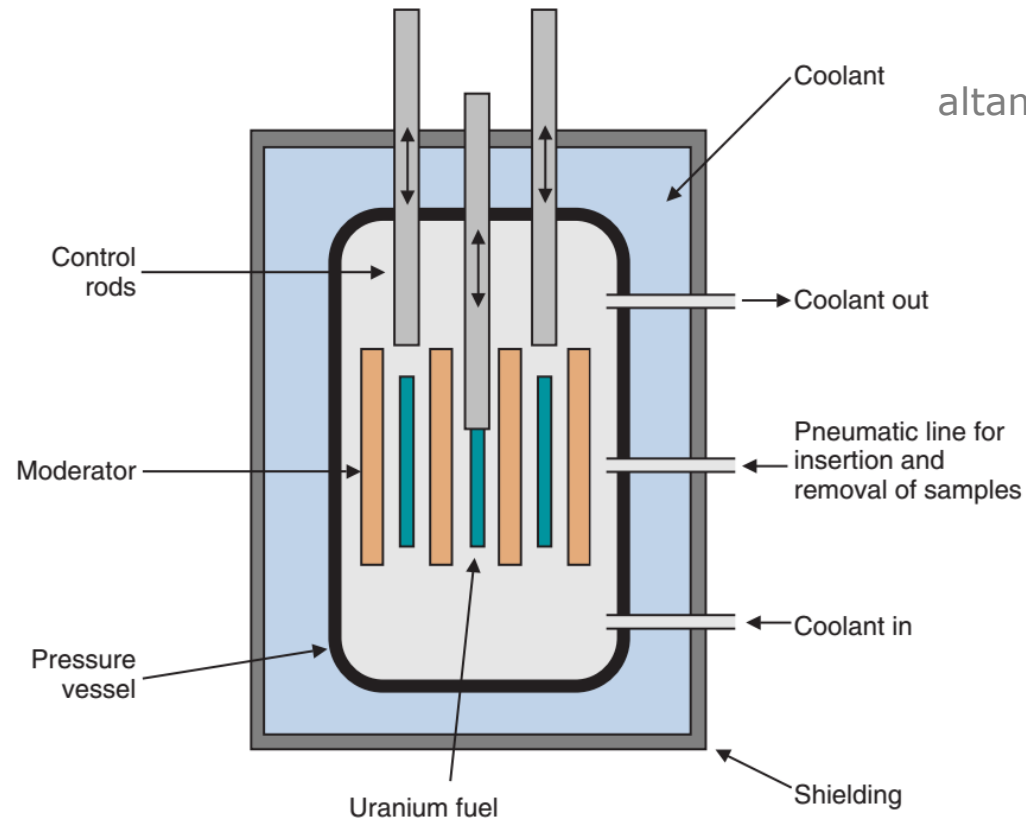
Radionucleidos producidos por reactores

- ✓ Una variedad de radionucleidos se producen en reactores que utilizan como combustible materiales de fisión como ^{235}U enriquecido y ^{239}Pu .
- ✓ Fisión espontánea con baja probabilidad.
- ✓ Fisión es la separación del núcleo pesado en dos fragmentos de aprox. igual masa junto con la emisión de 2 o 3 neutrones de energía de 1.5 MeV.
- ✓ En cada fisión se libera energía en forma de calor que puede utilizarse para generación de electricidad.
- ✓ Neutrones emitidos pueden causar posteriores fisiones e iniciar una reacción en cadena que debe ser controlada (moderadores).
- ✓ Neutrones térmicos (0.025 eV) interactúan con otros núcleos produciendo radionucleidos: fisión de elementos pesados , captura neutrónica o reacción del tipo $(n; \gamma)$.

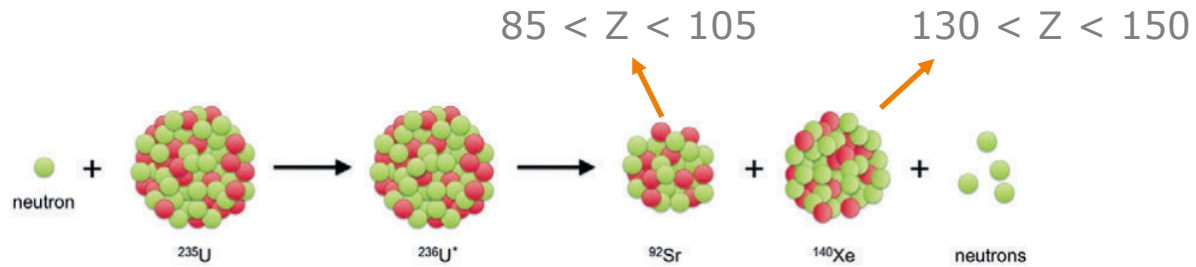
El núcleo del reactor contiene el combustible fissionable.



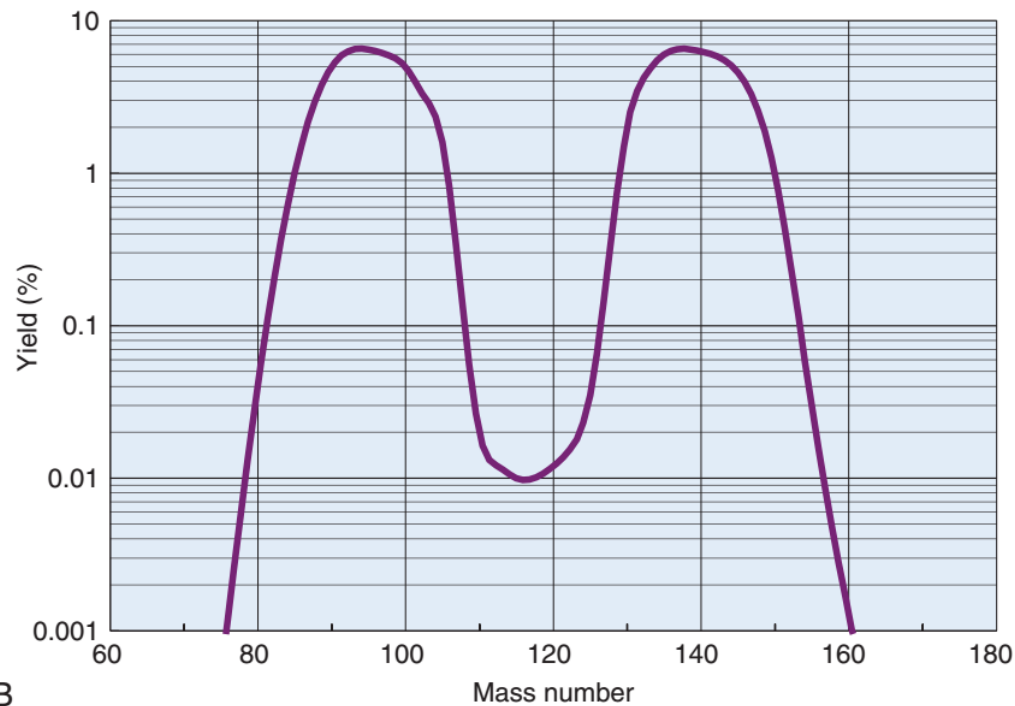
altamente inestable



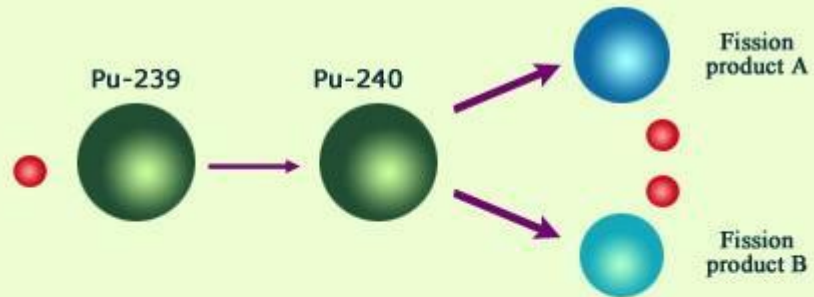
Productos de Fisión



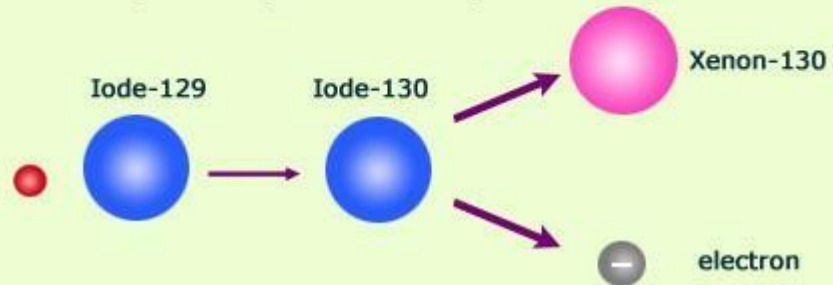
A



Neutron capture followed by a fission

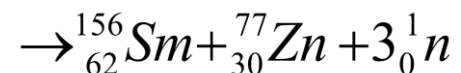
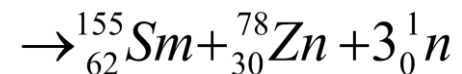
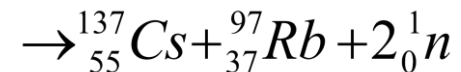
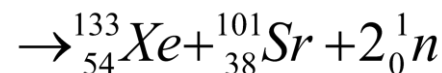
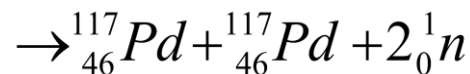
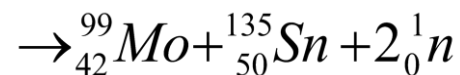
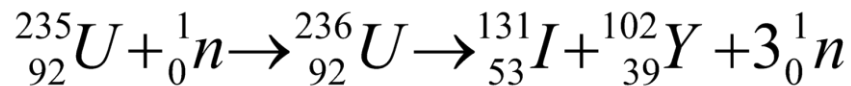


Capture simple followed by a beta decay



Fisión

- ✓ Los elementos fisionables son ^{235}U , ^{239}Pu , ^{237}Np , ^{233}U , ^{232}Th , y aquellos con números atómicos mayores a 90.
- ✓ Son separados por procedimientos químicos tales como precipitación, extracción por solventes, intercambio iónico, cromatografía, destilación.
- ✓ Radionucleidos clínicamente útiles: ^{131}I , ^{99}Mo , ^{133}Xe , ^{137}Cs provienen de la fisión del ^{235}U .



- ✓ La energía liberada por fisión es del orden de 200MeV.

Captura neutrónica o reacciones (n,γ)

- ✓ El núcleo blanco captura un neutrón térmico y emite rayos γ para producir un isótopo del mismo elemento.
- ✓ No es portador libre y su actividad específica es baja.
- ✓ No es necesaria una separación química a menos que naturalmente contenga otros nucleidos.

^{131}Te (que produce ^{131}I por β^- con $T_{1/2}=25$ min),
 ^{99}Mo , ^{197}Hg , ^{59}Fe , ^{51}Cr ,

$^{98}\text{Mo}(n; \gamma) ^{99}\text{Mo}$, $^{196}\text{Hg}(n; \gamma) ^{197}\text{Hg}$, $^{50}\text{Cr}(n; \gamma) ^{51}\text{Cr}$.

- ✓ El análisis por activación neutrónica es una herramienta importante en la detección de traza de elementos en ciencias forenses, industria y ciencias biológicas.

Sección transversal de activación

Sea n el número de átomos blancos por unidad de volumen, la variación de partículas del haz al atravesar el blanco:

$$\Delta\phi/\phi = n \sigma \Delta x$$

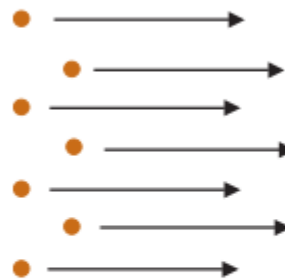
$$m \approx n \times \Delta x \times AW / (6.023 \times 10^{23})$$

La velocidad de activación por unidad de masa:

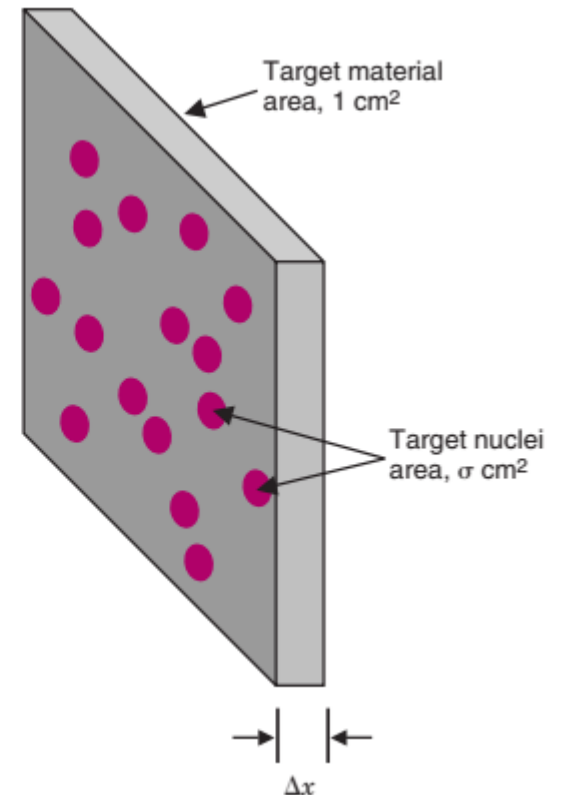
$$R \approx \Delta\phi/m$$

La velocidad de desintegración por unidad de masa:

$$A_s \text{ (Bq/g)} = R$$



Particle beam,
flux density ϕ



Ecuación para la Producción de Radionucleidos

La actividad del radionucleido producido en un ciclotrón o reactor:

$$A = IN\sigma(1 - e^{-\lambda t})$$


factor de saturación

Donde:

A, la actividad (des/s) del radionucleido producido

I, intensidad o flujo de las partículas incidentes [n. de part/(cm² s)]

N, n. de átomos blanco

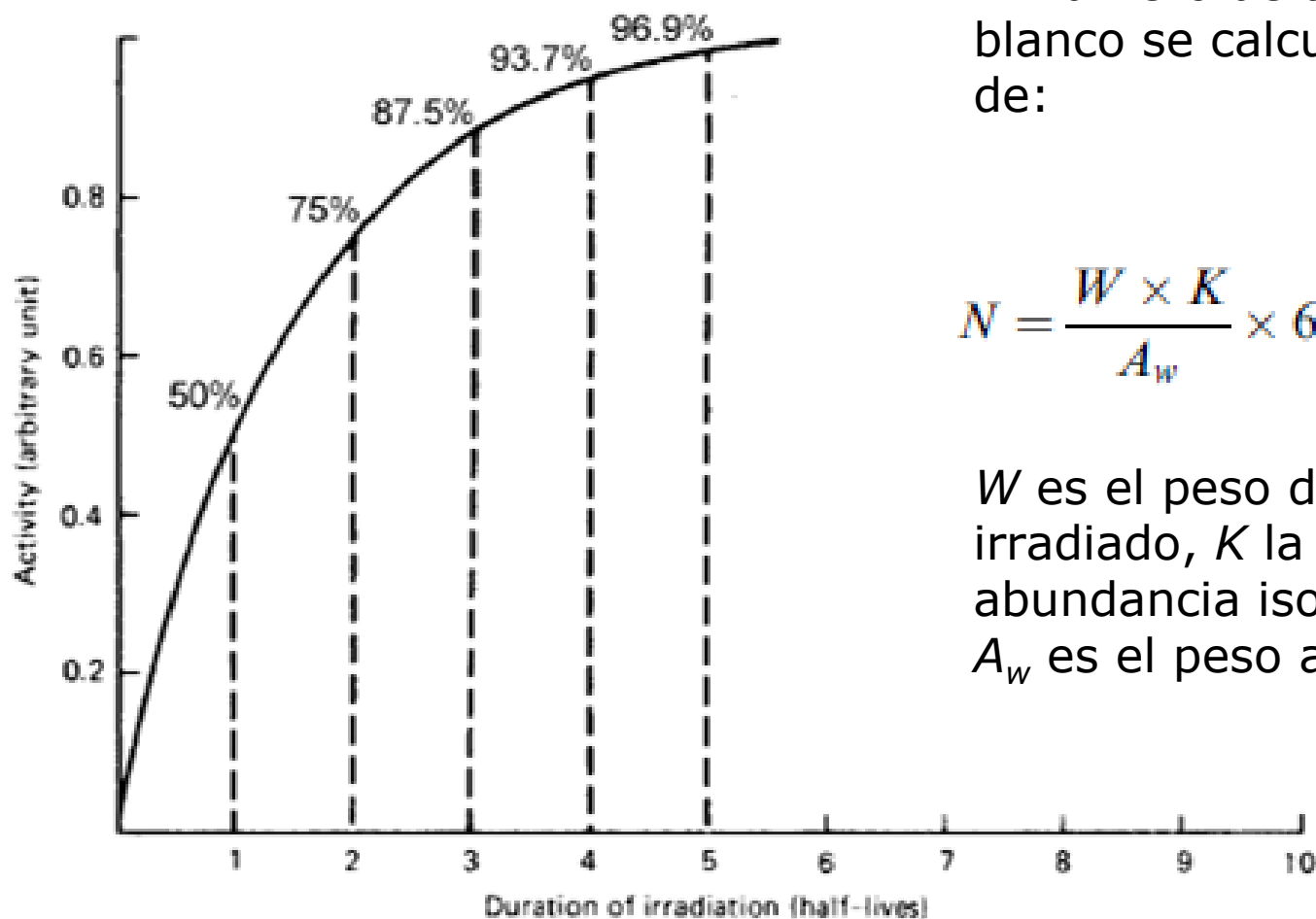
σ , sección eficaz transversal de formación del radionucleido (cm² o barn);

λ , constante de decaimiento. $0.693/t_{1/2}(\text{s}^{-1})$

t, tiempo de irradiación

Si $t > 5$ o 6 vidas medias el rendimiento es máximo:

$$A = IN\sigma$$



El número de átomos blanco se calcula a través de:

$$N = \frac{W \times K}{A_w} \times 6.02 \times 10^{23}$$

W es el peso del material irradiado, K la abundancia isotópica y A_w es el peso atómico

TABLE 5-1

NEUTRON-ACTIVATED RADIONUCLIDES OF IMPORTANCE IN BIOLOGY AND MEDICINE

Radionuclide	Decay Mode	Production Reaction	Natural Abundance of Target Isotope (%) [*]	$\sigma_c(\text{b})^{\dagger}$
^{14}C	β^-	$^{14}\text{N}(\text{n},\text{p})^{14}\text{C}$	99.6	1.81
^{24}Na	(β^-, γ)	$^{23}\text{Na}(\text{n}, \gamma)^{24}\text{Na}$	100	0.53
^{32}P	β^-	$^{31}\text{P}(\text{n}, \gamma)^{32}\text{P}$	100	0.19
		$^{32}\text{S}(\text{n}, \text{p})^{32}\text{P}$	95.0	0.1
^{35}S	β^-	$^{35}\text{Cl}(\text{n}, \text{p})^{35}\text{S}$	75.8	0.4
^{42}K	(β^-, γ)	$^{41}\text{K}(\text{n}, \gamma)^{42}\text{K}$	6.7	1.2
^{51}Cr	(EC, γ)	$^{50}\text{Cr}(\text{n}, \gamma)^{51}\text{Cr}$	4.3	17
^{59}Fe	(β^-, γ)	$^{58}\text{Fe}(\text{n}, \gamma)^{59}\text{Fe}$	0.3	1.1
^{75}Se	(EC, γ)	$^{74}\text{Se}(\text{n}, \gamma)^{75}\text{Se}$	0.9	30
^{125}I	(EC, γ)	$^{124}\text{Xe}(\text{n}, \gamma)^{125}\text{Xe} \xrightarrow{\text{EC}} ^{125}\text{I}$	0.1	110
^{131}I	(β^-, γ)	$^{130}\text{Te}(\text{n}, \gamma)^{131}\text{Te} \xrightarrow{\beta^-} ^{131}\text{I}$	33.8	0.24

^{*}Values from Browne E, Firestone RB: Table of Radioactive Isotopes. New York, 1986, John Wiley.¹

[†]Thermal neutron capture cross-section, in barns (b) (see "Activation Cross-Sections"). Values from Wang Y: Handbook of Radioactive Nuclides, Cleveland, Chemical Rubber Company, 1969.²

EC, Electron capture.

TABLE 4.1. Characteristics of commonly used radionuclides.

Nuclide	Physical half-life	Mode of decay (%)	γ -ray energy ^a (MeV)	Abundance (%)	Common production methods
^3_1H	12.3 yr	β^- (100)	—	—	$^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$
$^{11}_6\text{C}$	20.4 min	β^+ (100)	0.511 (annihilation)	200	$^{10}\text{B}(d, n)^{11}\text{C}$ $^{14}\text{N}(p, \alpha)^{11}\text{C}$
$^{13}_7\text{N}$	10 min	β^+ (100)	0.511 (annihilation)	200	$^{12}\text{C}(d, n)^{13}\text{N}$ $^{16}\text{O}(p, \alpha)^{13}\text{N}$ $^{13}\text{C}(p, n)^{13}\text{N}$
$^{14}_6\text{C}$	5730 yr	β^- (100)	—	—	$^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$
$^{15}_8\text{O}$	2 min	β^+ (100)	0.511 (annihilation)	200	$^{14}\text{N}(d, n)^{15}\text{O}$ $^{15}\text{N}(p, n)^{15}\text{O}$
$^{18}_9\text{F}$	110 min	β^+ (97) EC(3)	0.511 (annihilation)	194	$^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$
$^{32}_{15}\text{P}$	14.3 days	β^- (100)	—	—	$^{32}\text{S}(n, p)^{32}\text{P}$
$^{51}_{24}\text{Cr}$	27.7 days	EC(100)	0.320	9	$^{50}\text{Cr}(n, \gamma)^{51}\text{Cr}$
$^{52}_{26}\text{Fe}$	8.3 hr	β^+ (56) EC(44)	0.165 0.511 (annihilation)	100 112	$^{55}\text{Mn}(n, 4n)^{52}\text{Fe}$ $^{50}\text{Cr}(\alpha, 2n)^{52}\text{Fe}$
$^{57}_{27}\text{Co}$	271 days	EC(100)	0.014 0.122 0.136	9 86 11	$^{56}\text{Fe}(d, n)^{57}\text{Co}$
$^{58}_{27}\text{Co}$	71 days	β^+ (14.9) EC(85.1)	0.811	99.5	$^{55}\text{Mn}(\alpha, n)^{58}\text{Co}$
$^{59}_{26}\text{Fe}$	45 days	β^- (100)	1.099 1.292	56 43	$^{58}\text{Fe}(n, \gamma)^{59}\text{Fe}$
$^{60}_{27}\text{Co}$	5.2 yr	β^- (100)	1.173 1.332	100 100	$^{59}\text{Co}(n, \gamma)^{60}\text{Co}$
$^{62}_{28}\text{Zn}$	9.3 hr	β^+ (8) EC(92)	0.420 0.511 0.548 0.597	25 31 15 26	$^{63}\text{Cu}(p, 2n)^{62}\text{Zn}$
$^{62}_{29}\text{Cu}$	9.7 min	β^+ (97) EC(3)	0.511 (annihilation)	194	$^{62}\text{Ni}(p, n)^{62}\text{Cu}$ or $^{62}\text{Zn} \xrightarrow{\beta^+, \text{EC}} ^{62}\text{Cu}$
$^{67}_{29}\text{Cu}$	2.6 days	β^- (100)	0.185 0.92	49 23	$^{67}\text{Zn}(n, p)^{67}\text{Cu}$
$^{67}_{31}\text{Ga}$	78.2 hr	EC(100)	0.093 0.184	40 20	$^{68}\text{Zn}(p, 2n)^{67}\text{Ga}$

TABLE 4.1 (continued)

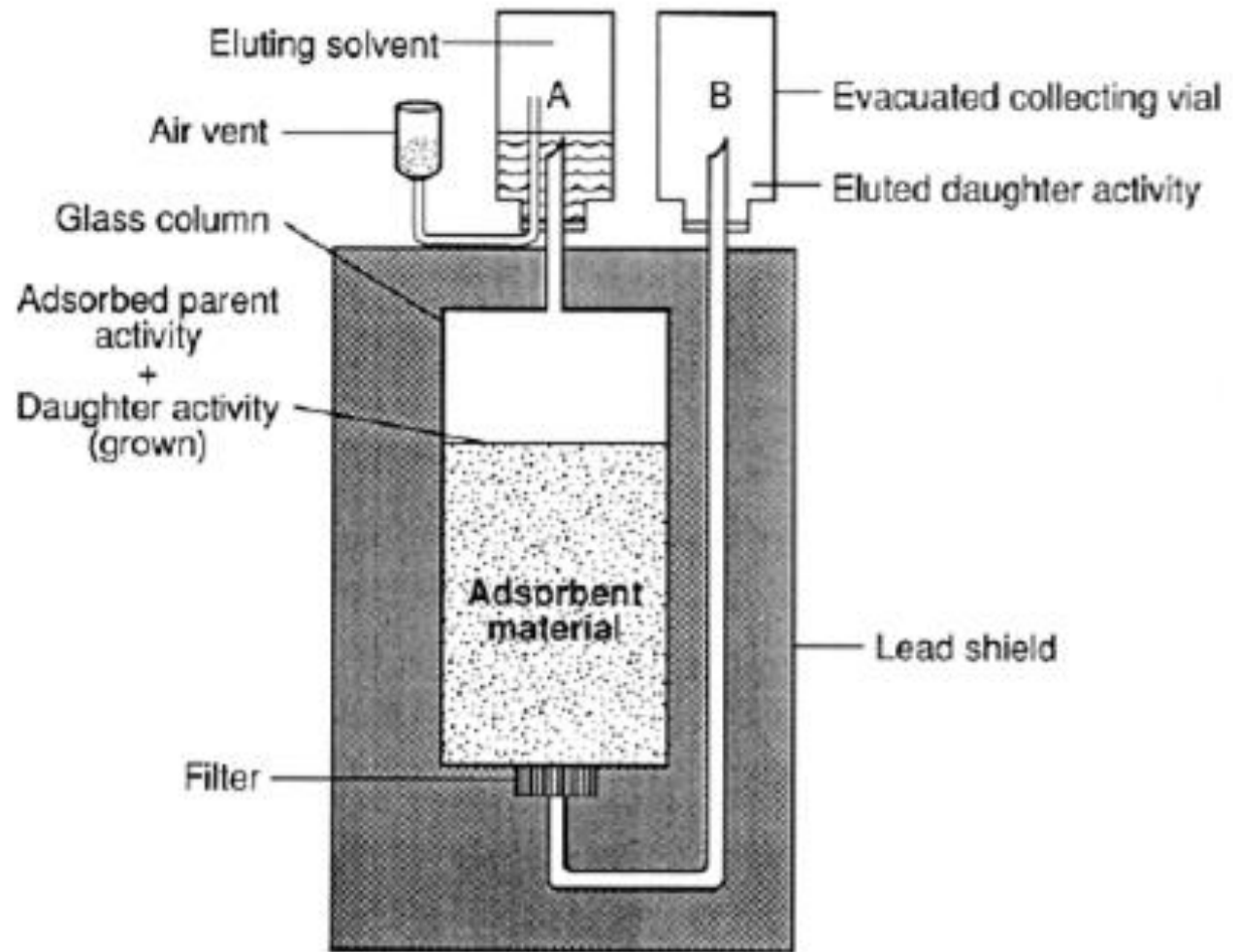
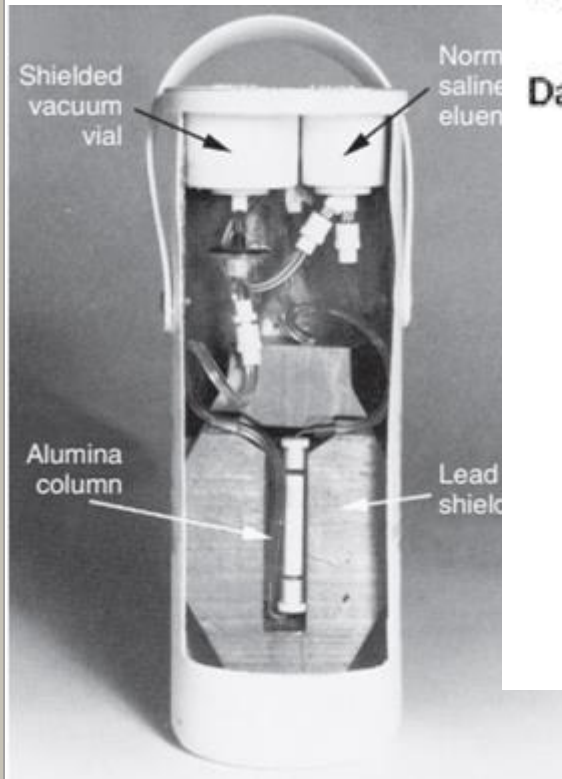
Nuclide	Physical half-life	Mode of decay (%)	γ -ray energy ^a (MeV)	Abundance (%)	Common production method
$^{68}_{31}\text{Ga}$	68 min	β^+ (89)	0.511	178	$^{68}\text{Zn}(p, n)^{68}\text{Ga}$
$^{82}_{37}\text{Rb}$	75 s	EC(11)	(annihilation)		
		β^+ (95)	0.511	190	$^{82}\text{Sr} \xrightarrow{\text{EC}} ^{82}\text{Rb}$
		EC(5)	(annihilation)		25.5 days
$^{82}_{38}\text{Sr}$	25.5 days	EC(100)	776	13	
$^{88}_{38}\text{Sr}$	50.6 days	β^- (100)	—	—	$^{85}\text{Rb}(p, 4n)^{82}\text{Sr}$
$^{90}_{38}\text{Sr}$	28.5 yr	β^- (100)	—	—	$^{88}\text{Sr}(n, \gamma)^{89}\text{Sr}$
$^{90}_{39}\text{Y}$	2.7 days	β^- (100)	—	—	$^{235}\text{U}(n, f)^{90}\text{Sr}$
$^{99}_{42}\text{Mo}$	66 hr	β^- (100)	0.181	6	$^{89}\text{Y}(n, \gamma)^{90}\text{Y}$
			0.740	12	$^{98}\text{Mo}(n, \gamma)^{99}\text{Mo}$
			0.780	4	$^{235}\text{U}(n, f)^{99}\text{Mo}$
$^{99\text{m}}_{43}\text{Tc}$	6.0 hr	IT(100)	0.140	90	$^{99}\text{Mo} \xrightarrow{\beta^-} ^{99\text{m}}\text{Tc}$
$^{111}_{49}\text{In}$	2.8 days	EC(100)	0.171	90	$^{111}\text{Cd} \xrightarrow{66\text{hr}} ^{111}\text{In}$
			0.245	94	
$^{113\text{m}}_{49}\text{In}$	100 min	IT(100)	0.392	64	$^{112}\text{Sn}(n, \gamma)^{113}\text{Sn}$
$^{123}_{53}\text{I}$	13.2 hr	EC(100)	0.159	83	$^{113}\text{Sn} \xrightarrow{\text{EC}} ^{113\text{m}}\text{In}$
$^{124}_{53}\text{I}$	4.2 days	β^+ (23)	0.511	46	$^{121}\text{Sb}(\alpha, 2n)^{123}\text{I}$
		EC(77)	(annihilation)		$^{124}\text{Te}(p, n)^{124}\text{I}$
$^{125}_{53}\text{I}$	60 days	EC(100)	0.035	7	$^{124}\text{Xe}(n, \gamma)^{125}\text{Xe}$
			x ray(0.027–0.032)	140	$^{125}\text{Xe} \xrightarrow{\text{EC}} ^{125}\text{I}$
$^{131}_{53}\text{I}$	8.0 days	β^- (100)	0.284	6	$^{130}\text{Te}(n, \gamma)^{131}\text{Te}$
			0.364	81	$^{235}\text{U}(n, f)^{131}\text{Te}$
			0.637	7	$^{131}\text{Te} \xrightarrow{\beta^-} ^{131}\text{I}$
$^{133}_{54}\text{Xe}$	5.3 days	β^- (100)	0.081	37	$^{235}\text{U}(n, f)^{131}\text{I}$
$^{137}_{55}\text{Cs}$	30.0 yr	β^- (100)	0.662	85	$^{235}\text{U}(n, f)^{133}\text{Xe}$
$^{153}_{62}\text{Sm}$	1.9 days	β^- (100)	70	5	$^{235}\text{U}(n, f)^{137}\text{Cs}$
			103	28	$^{152}\text{Sm}(n, \gamma)^{153}\text{Sm}$
$^{186}_{75}\text{Re}$	3.8 days	β^- (92)	137	9	$^{185}\text{Re}(n, \gamma)^{186}\text{Re}$
		EC(8)			
$^{201}_{81}\text{Tl}$	73 hr	EC(100)	0.167	9.4	$^{203}\text{Tl}(p, 3n)^{201}\text{Pb}$
			x ray(0.069–0.083)	93	$^{201}\text{Pb} \xrightarrow{\text{EC}} ^{201}\text{Tl}$
					9.3 hr

Generadores de Radionucleidos

Principios de un generador

- ✓ Proveen fuentes de radionucleidos de vida media corta clinicamente útiles.
- ✓ El radionucleido padre tiene una vida media mayor que la de la hija.
- ✓ Padre e hija son químicamente separables.
- ✓ Facilmente transportables a institutos sin ciclotrones o facilidades de reactor.
- ✓ Se produce equilibrio secular entre padre e hija.
- ✓ La actividad de la hija es eluida en estado de portador libre.

Generadores de Radionucleidos



El primer generador de radionucleido comercial:



Desarrollado en 1960 en el Laboratorio Nacional de Brookhaven.

Son pocos los generadores útiles en medicina:



TABLE 5.1. Several generator systems useful in nuclear medicine.

Parent	Parent $t_{1/2}$	Nuclear reaction	Daughter	Daughter $t_{1/2}$	Mode of daughter decay	Principal photon energy (keV) (% abundance)	Column	Eluant
^{99}Mo	66 hr	Fission $^{98}\text{Mo}(n, \gamma)$	$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6 hr	IT ^a	140 (90)	Al_2O_3	0.9% NaCl
^{113}Sn	115 days	$^{112}\text{Sn}(n, \gamma)$	$^{113\text{m}}\text{In}$	99.5 min	IT	392 (64)	ZrO_2	0.05 N HCl
^{87}Y	80 hr	$^{88}\text{Sr}(p, 2n)$	$^{87\text{m}}\text{Sr}$	2.8 hr	IT	388 (82)	Dowex 1 $\times$ 8	0.15 M NaHCO_3
^{68}Ge	271 days	$^{69}\text{Ga}(p, 2n)$	^{68}Ga	68 min	β^+	511 (178)	Al_2O_3	0.005 M EDTA
							SnO_2	1 N HCl
^{62}Zn	9.3 hr	$^{63}\text{Cu}(p, 2n)$	^{62}Cu	9.7 min	β^+	511 (194)	Dowex 1 $\times$ 8	2 N HCl
^{137}Cs	30 yr	Fission	$^{137\text{m}}\text{Ba}$	2.6 min	IT	662 (85)	Ammonium molybdo- phosphate	0.1 N HCl + 0.1 N NH_4Cl
^{81}Rb	4.6 hr	$^{79}\text{Br}(\alpha, 2n)$	$^{81\text{m}}\text{Kr}$	13 sec	IT	190 (67)	BioRad AG 50	Water or air
^{82}Sr	25.5 days	$^{85}\text{Rb}(p, 4n)$	^{82}Rb	75 sec	β^+	511 (190)	SnO_2	0.9% NaCl
^{191}Os	15.4 days	$^{190}\text{Os}(n, \gamma)$	$^{191\text{m}}\text{Ir}$	4.9 sec	IT	129 (26)	BioRad AG1	4% NaCl
^{195}Hg	41.5 hr	$^{197}\text{Au}(p, 3n)$	$^{195\text{m}}\text{Au}$	30.6 sec	IT	262 (68)	Silica gel coated with ZnS	Sodium thiosulfate solution

Data from Browne E, Firestone RB. *Table of Radioactive Isotopes*. 1st ed. New York: Wiley; 1986.

^aIT, isomeric transition.

^{99}Mo -
 $^{99\text{m}}\text{Tc}$

Un generador de
100mCi (3,7GBq)

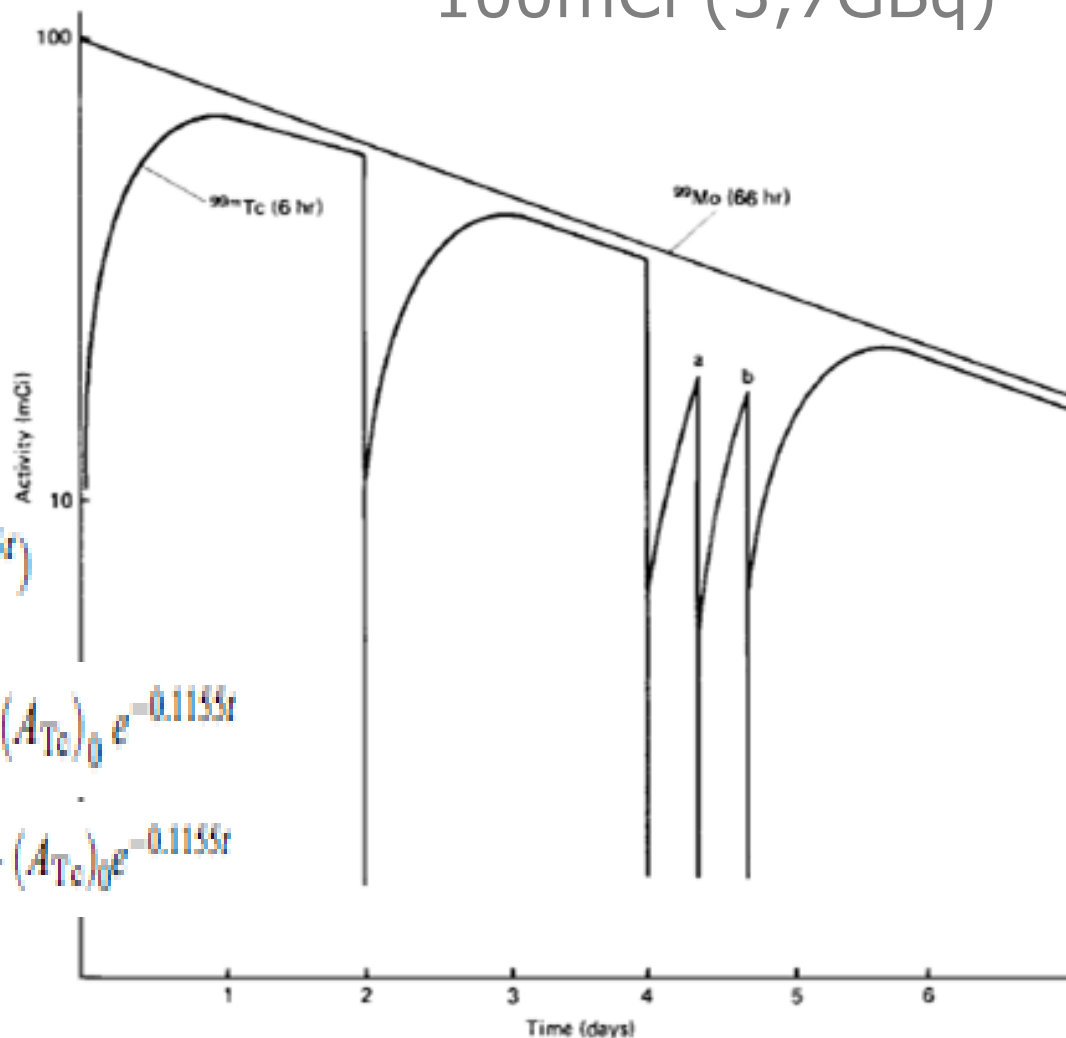
$$\lambda_{\text{Mo}} = 0.693/66 = 0.0105 \text{ hr}^{-1}$$

$$\lambda_{\text{Tc}} = 0.693/6 = 0.1155 \text{ hr}^{-1}$$

$$A_{\text{Tc}} = 1.1(A_{\text{Mo}})_0(e^{-0.0105t} - e^{-0.1155t})$$

$$A_{\text{Tc}} = 1.1(A_{\text{Mo}})_0(e^{-0.0105t} - e^{-0.1155t}) + (A_{\text{Tc}})_0 e^{-0.1155t}$$

$$A_{\text{Tc}} = 0.957(A_{\text{Mo}})_0(e^{-0.0105t} - e^{-0.1155t}) + (A_{\text{Tc}})_0 e^{-0.1155t}$$



<https://www.iaea.org/resources/databases/atomic-masses-q-values-and-threshold-energies>

<https://www.nndc.bnl.gov/qcalc/>

Actividad Específica

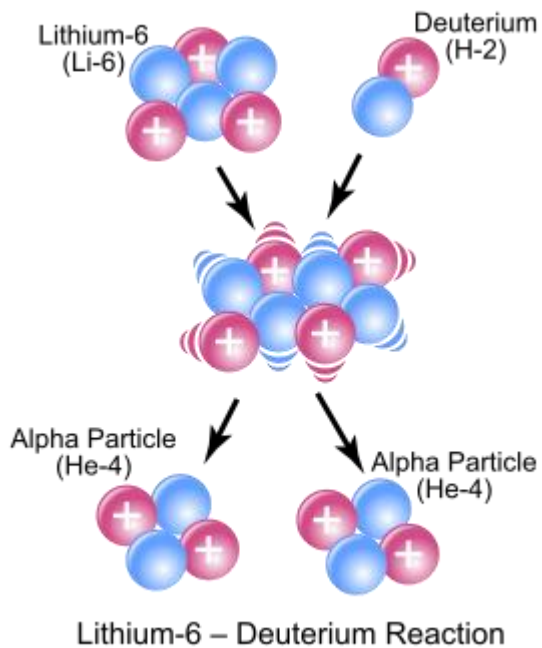
Es la actividad por unidad de masa del radionucleido:

Por ejemplo, 100mg de albumina de ^{131}I que contiene 150mCi (5,55GBq) de ^{131}I , tendra una actividad especifica:

$$A_{esp} = \frac{150mCi}{100mg} = 1,5mCi / mg$$

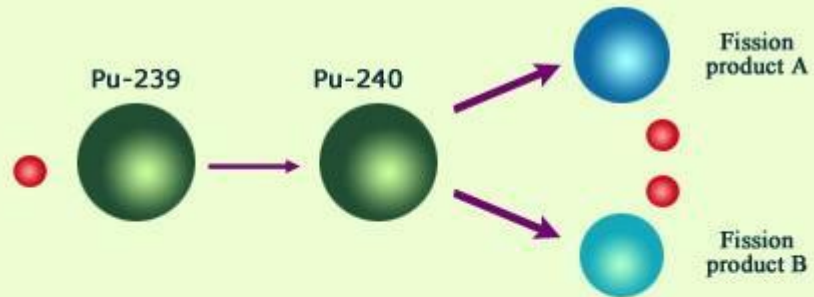
$$A_{esp} = \frac{5,55GBq}{100mg} = 55,5MBq / mg$$

Canales de reacción y Q de la reacción



$$Q = (M_X + M_a - M_Y - M_b)c^2$$

Neutron capture followed by a fission



Capture simple followed by a beta decay

