



El núcleo y sus radiaciones

clase 6

Departamento de Física, Facultad de Ciencias Exactas - UNLP
Instituto de Física La Plata - CONICET
Calle 49 y 115 La Plata





Reacciones nucleares

Existen más de 2700 radionucleidos naturales. Sin embargo, la mayoría de ellos no son de utilidad en Medicina Nuclear.

- Vidas medias extremadamente cortas o extremadamente largas.

- Elementos muy pesados (ej.: U, Ra, Th) que no son importantes desde el punto de vista del metabolismo o procesos fisiológicos.

(algunos de estos se emplearon como marcadores en los años 1920-1930. Pero debido a sus características no se usan desde entonces).

- Abundancia, difíciles de obtener.



Reacciones nucleares

Entonces ¿Qué hacemos?

Fabricación de radioisótopos de interés.

Veremos como obtener radioisótopos a partir de elementos estables. Discutiremos varios procedimientos y las características, ventajas y desventaja de cada uno

Procedimiento madre:

Reacciones nucleares



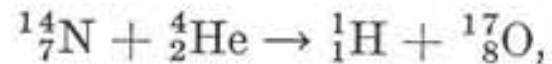
Reacciones nucleares

Ya estudiamos el decaimiento de núcleos inestables, y en especial la emisión espontánea de una partícula α o β que puede ser seguida por una emisión γ .

No se hizo nada para iniciar este decaimiento y nada se puede hacer para controlarlo.

Ahora estudiaremos **reacciones nucleares**, que son el resultado de los procesos nucleares causados al bombardear un núcleo con una partícula, y no por un proceso natural espontáneo.

Rutherford, 1919: sugirió que una partícula con energía cinética suficiente podría penetrar en un núcleo. El resultado sería un nuevo núcleo con distinto número atómico y masa



Rutherford usó partículas α procedentes de fuentes radiactivas naturales. Es posible incrementar la energía de los proyectiles usando aceleradores de partículas.



Reacciones nucleares

Cuando dos núcleos, venciendo la repulsión coulombiana, llegan a quedar muy cerca uno del otro (dentro del alcance de la fuerza nuclear), puede ocurrir un **reagrupamiento de los nucleones**.

Reacción nuclear.

Se producen bombardeando un núcleo que sirve de blanco con un proyectil, en general un nucleón o un núcleo liviano.

(no se emplean núcleos pesados por su carga: para vencer la repulsión coulombiana se requiere que el proyectil tenga una energía cinética muy alta).

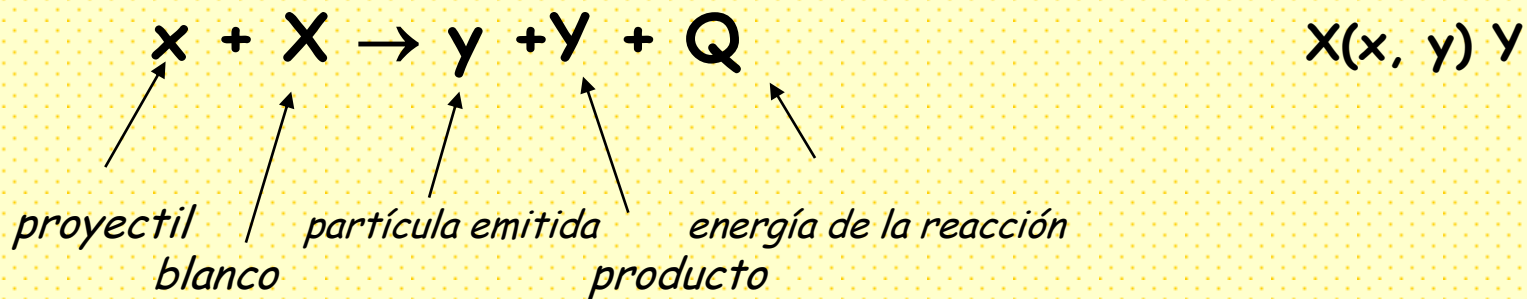
Alguna veces se emplean fotones como proyectiles (fotoreacciones).

En la mayoría de las reacciones se produce la misma u otra partícula, dejando un núcleo final o residual en su estado fundamental o excitado.



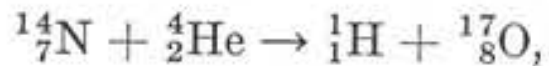
Reacciones nucleares

La primera reacción nuclear artificial (1932) fue $p + {}^7\text{Li} \rightarrow {}^8\text{Be} \rightarrow {}^4\text{He} + {}^4\text{He}$



$$Q = (m_x + M_x - m_y - M_y) c^2$$

Conservación de la energía y de la cantidad de movimiento





Reacciones nucleares

Las reacciones nucleares están sujetas a varias leyes de conservación:

- Conservación de carga
- Conservación de la cantidad de movimiento lineal y angular
- Conservación de la energía (si consideramos el Q).

Una ley más de conservación, que no estaba prevista en la física clásica, es la

conservación de la cantidad total de nucleones.

(El número de protones y neutrones no necesitan conservarse por separado; hemos visto que en el decaimiento β los neutrones y los protones se transforman uno en el otro).

En virtud de la conservación del número nucleónico, la suma de los números de masa iniciales también debe ser igual a la suma de los números de masa finales. En general, éstas no son colisiones elásticas y, en consecuencia

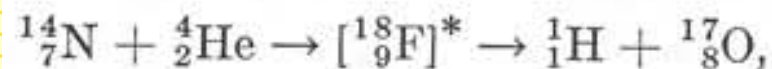
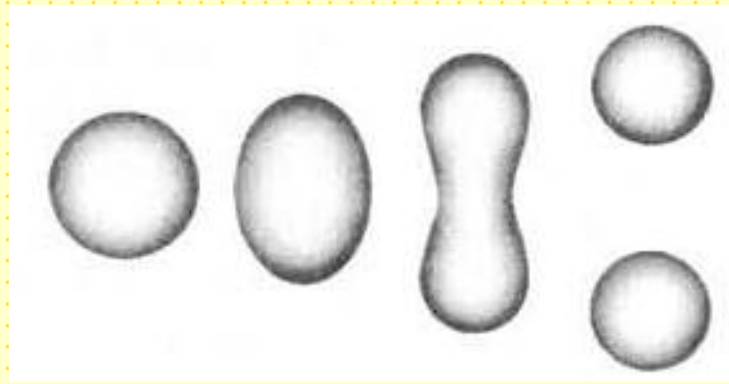
la masa total inicial no es igual a la masa total final.



Reacciones nucleares

Si las energías de las partículas involucradas no son muy altas, la reacción se produce en dos etapas:

- 1- La partícula incidente es capturada, formándose un núcleo intermedio (o compuesto)
- 2- El núcleo compuesto se desexcita emitiendo una partícula o por algún otro medio.

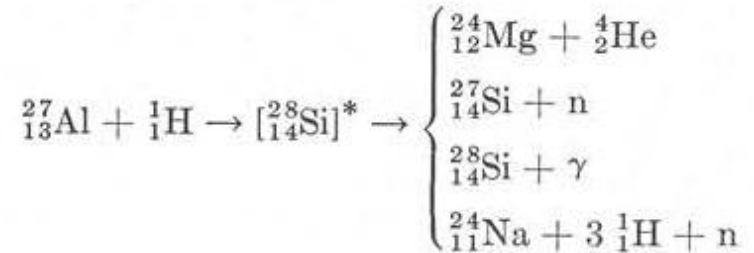
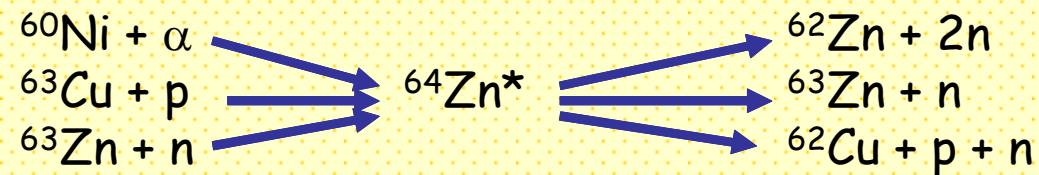




Reacciones nucleares

núcleo compuesto \rightarrow el decaimiento no depende de la manera en que se formó
(vidas medias extremadamente corta, del orden de 10^{-8} s o menos)

Para una determinada primera etapa de una reacción nuclear, existen varios modos de desexcitación del núcleo compuesto. Cada modo se denomina **canal**.



Algunas reacciones nucleares NO PUEDEN ser explicadas a partir del modelo de núcleo compuesto. Ejemplo:





Reacciones nucleares

Si las partículas incidente y saliente son las mismas,
el proceso se denomina **dispersión**.

Elásticas; el núcleo queda en el mismo estado, de modo que la energía cinética se conserva.

- ❖ Interacción Coulombiana
- ❖ Interacción nuclear

$$x = y$$

$$X = Y$$

$$Q = 0$$

Inelásticas

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

directa → interacción con un núcleo



Reacciones nucleares

La diferencia entre las masas antes y después de la reacción corresponde a la **energía de reacción**, de acuerdo con la relación entre masa y energía $E=mc^2$.

$$M_i(m_i, m_f)M_f$$

$$Q = [(M_i + m_i) - (M_f + m_f)]c^2.$$

(masas atómicas)

si $Q > 0$ reacción exotérmica

si $Q < 0$ reacción endotérmica

(También se usan las expresiones exoérgica y endoérgica)

si $Q > 0$, la reacción ocurre para todos los valores de la energía cinética del proyectil.

si $Q < 0$, el proyectil debe tener una energía cinética mínima para producir la reacción.



Reacciones nucleares

El umbral de energía cinética del proyectil en el sistema de referencia L es:

$$E_k = -Q \frac{M_i + m_i + m_f + M_f}{2M_i}$$

Si se las puede tratar en forma no relativista (Q pequeño), el umbral en el mismo sistema de referencia es:

$$E_k = -Q \frac{M_i + m_i}{M_i} = -Q \left(1 + \frac{m_i}{M_i} \right)$$



Reacciones nucleares

En algunos casos, el proyectil es capturado, pero no se emite una nueva partícula. Se emite un rayo γ , cuya energía depende de varios factores.



También puede darse el proceso inverso: un núcleo absorbe un rayo γ de energía suficiente para que una partícula sea emitida. Este proceso, equivalente al efecto fotoeléctrico en átomos, se denomina **reacción fotonuclear**.



Reacciones nucleares

Muchas veces, el núcleo proveniente de una reacción nuclear es inestable. En efecto, es por medio de las reacciones nucleares que se forman los radionucleídos artificiales, la radiactividad artificial (F. Joliot, I. Curie, 1934).

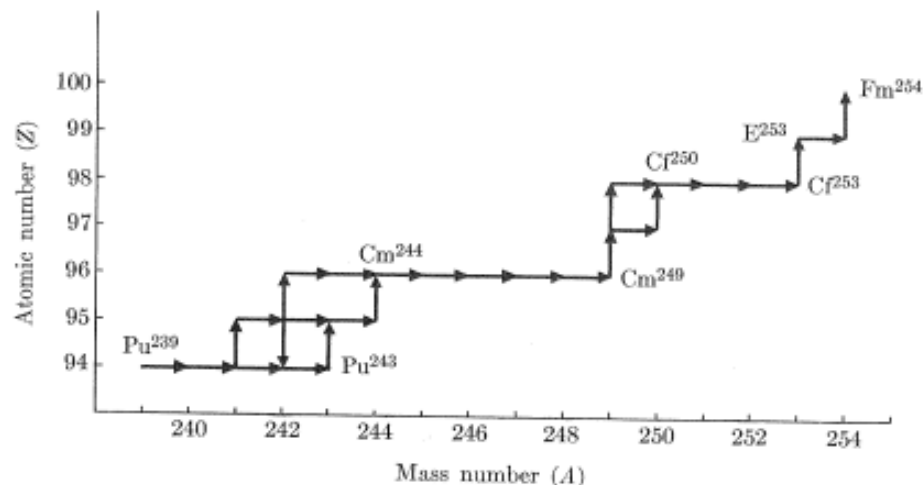
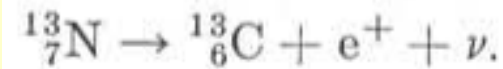
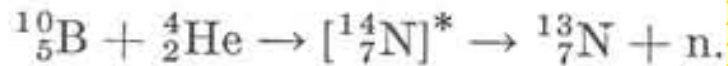
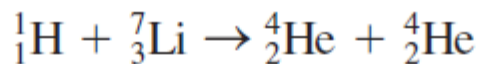


FIG. 12-2. Nuclear reaction sequences for production of heavy nuclides by intense slow neutron irradiation of Pu²³⁹. (From Seaborg, *The Transuranium Elements*, gen. ref.).



Reacciones nucleares

Algunos ejemplos.



Las masas iniciales y finales son:

A: ${}^1_1\text{H}$	1.007825 u	C: ${}^4_2\text{He}$	4.002603 u
B: ${}^7_3\text{Li}$	<u>7.016004 u</u>	D: ${}^4_2\text{He}$	<u>4.002603 u</u>
	8.023829 u		8.005206 u

Se ve que

$$M_A + M_B - M_C - M_D = 0.018623 \text{ u}$$

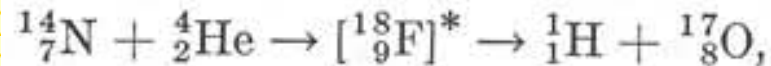
$$Q = (0.018623 \text{ u})(931.5 \text{ MeV/u}) = 17.35 \text{ MeV}$$

Reacción exotérmica.



Reacciones nucleares

Algunos ejemplos.



A: ${}^4_2\text{He}$	4.002603 u	C: ${}^{17}_8\text{O}$	16.999132 u
B: ${}^{14}_7\text{N}$	<u>14.003074 u</u>	D: ${}^1_1\text{H}$	<u>007825 u</u>
	18.005677 u		18.006957 u

$$Q = (-0.001280 \text{ u})(931.5 \text{ MeV/u}) = -1.192 \text{ MeV}$$

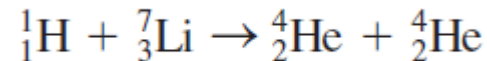
Reacción endotérmica. La reacción se produciría bombardeando núcleos en reposo de ${}^{14}\text{N}$ con partículas alfa de un acelerador. En este caso, la energía cinética de una partícula alfa **debe ser mayor** que 1.192 MeV.

$$E_k = -Q \frac{M_i + m_i}{M_i} = -Q \left(1 + \frac{m_i}{M_i}\right)$$

En este caso, la energía cinética del proyectil debe ser al menos 1.533 MeV.



Reacciones nucleares



Para que una partícula cargada penetre en el núcleo de otro átomo y cause una reacción, en general debe tener una energía cinética inicial suficiente para superar la barrera de energía potencial causada por las fuerzas electrostáticas de repulsión.

Si consideramos al protón y al núcleo de ${}^7\text{Li}$ con simetría esférica y radios dados por:

$$R = 1.07A^{1/3}$$

sus centros estarán a una distancia de 3.5×10^{-15} m cuando se toquen. La energía potencial de repulsión protón (carga $+e$)- ${}^7\text{Li}$ (carga $+3e$) a esta distancia es:

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(e)(3e)}{r} = (9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2) \frac{(3)(1.6 \times 10^{-19} \text{ C})^2}{3.5 \times 10^{-15} \text{ m}} \\ &= 2.0 \times 10^{-13} \text{ J} = 1.2 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Aun cuando la reacción es exoérgica, el protón debe tener una energía cinética mínima de 1.2 MeV para que suceda la reacción.



Reacciones nucleares

EJEMPLO 1: Con $Z=1$ producto: AGUA PESADA

^1H (H «común»): $Z=1$, $N=0$, $A=1$.

^2H (deuterio, D): $Z=1$, $N=1$, $A=2$.

En el agua común, 155 PPM de D por H.

En el agua pesada 99.75% de D.

Propiedad	D ₂ O (agua pesada)	H ₂ O (agua común)
Punto de fusión (°C)	3,82	0,0
Punto de ebullición (°C)	101,4	100,0
Densidad (a 20 °C, g/mL)	1,1056	0,9982
Temp. de máxima densidad (°C)	11,6	4,0
Viscosidad (a 20 °C, centipoise)	1,25	1,005
Tensión superficial (a 25 °C, dyn·cm)	71,93	71,97
Entalpía de fusión (cal/mol)	1,515	1,436
Entalpía de vaporización (cal/mol)	10,864	10,515
pH (a 25 °C)	7,41	7,00

Masa molecular (MM) del Agua Natural: 18 uma

Masa molecular del Agua Pesada: 20 uma.

Esta es "Agua Pesada no irradiada": solamente contiene los isótopos ^1H y ^2H (ambos "estables"). La composición de O no está modificada (O natural)

En nuestro país se produce en la "Planta Industrial Arroyito", Neuquén; Capacidad: 200 t/a



Reacciones nucleares

En un reactor, el agua pesada es irradiada. Y se vuelve radioactiva.



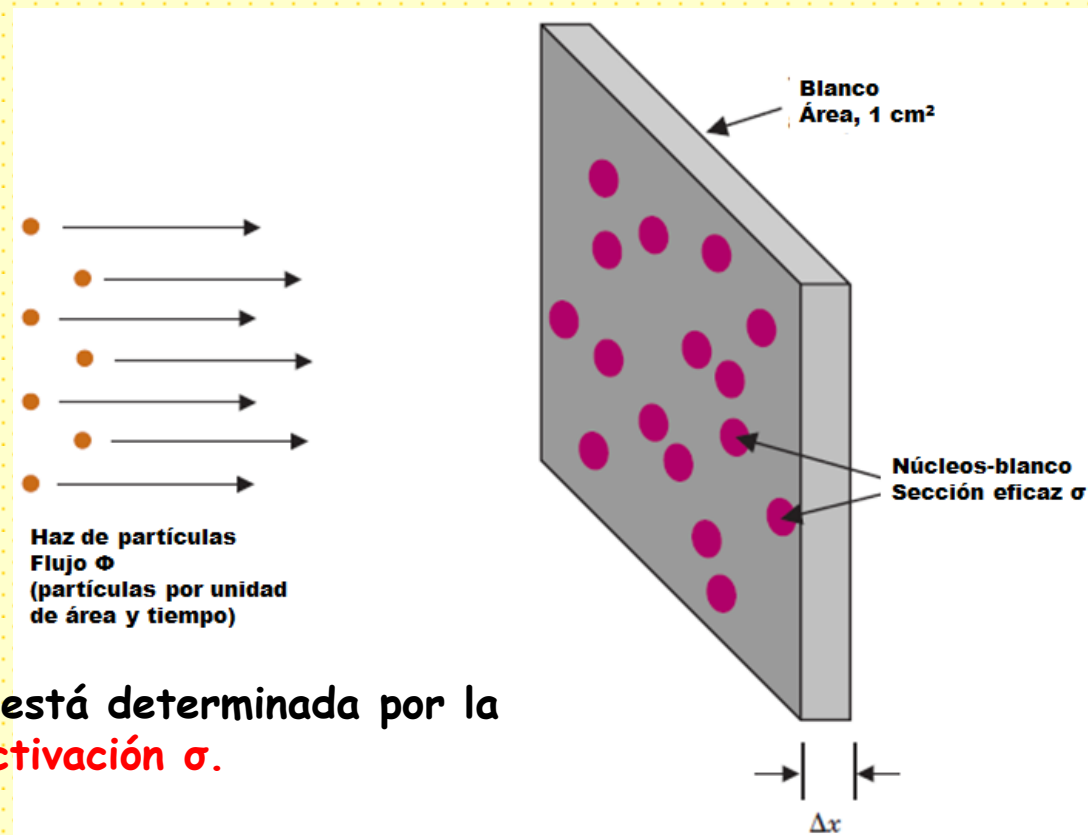
Posgrado UNLP/Radiactividad y Medio



Sección eficaz

El número de reacciones R que se producen al irradiar un blanco con un haz de partículas depende de:

- Intensidad del haz de partículas (cantidad de partículas en el haz),
- El número de núcleos-blanco en la muestra,
- La probabilidad de que el proyectil interactúe con un núcleo-blanco.



Esta probabilidad de interacción está determinada por la **sección eficaz de activación σ** .



Sección eficaz

σ es una medida del número de reacciones por unidad de tiempo y por partícula del blanco respecto del número de partículas incidentes

$$\sigma = R / (N.I)$$

R : Reacciones por unidad de tiempo

N: Partículas en el blanco por unidad de área

I: Partículas incidentes por unidad de área y tiempo.

$$[\sigma] = \text{m}^2$$

$$10^{-28} \text{ m}^2 = 1 \text{ barn}$$

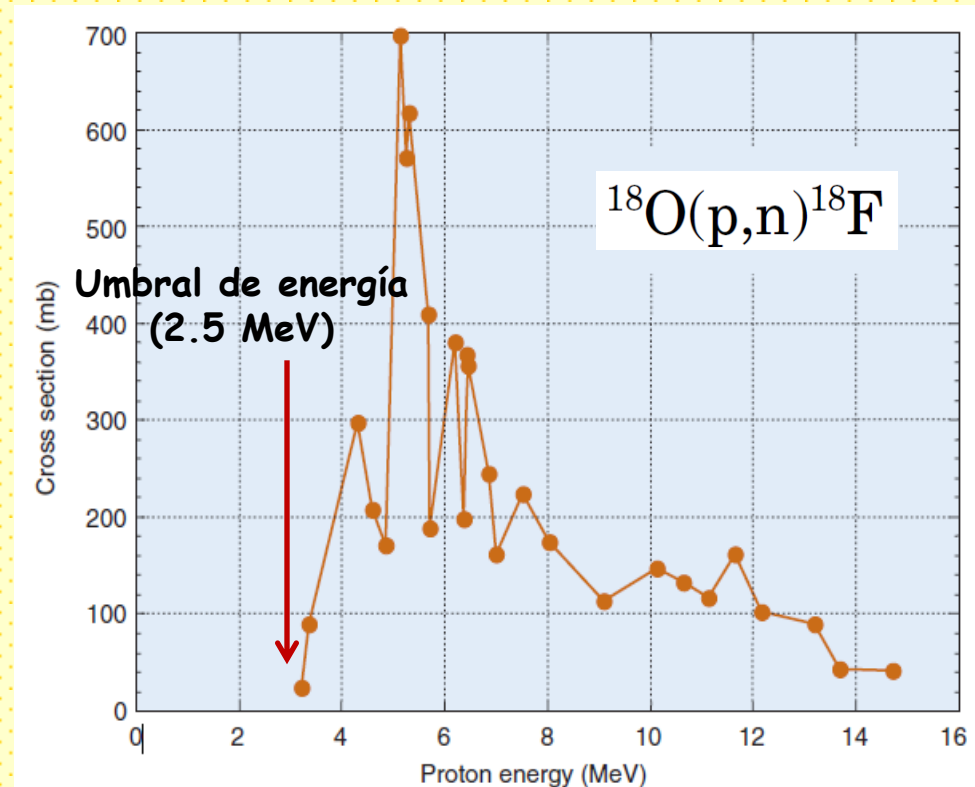
Interpretación geométrica de σ : área efectiva del núcleo-blanco.

Sección eficaz

σ es característica del núcleo blanco y depende de:

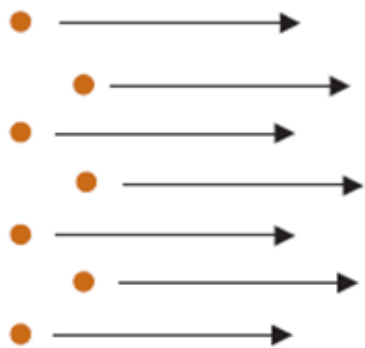
- Tipo de partícula y energía del proyectil.
- La reacción involucrada.

Debido a su importancia en la producción de radionucleidos vía reacciones nucleares, la sección eficaz para neutrones térmicos (proyectil) han sido estudiadas con detalle y se reportan en las tablas de isótopos.



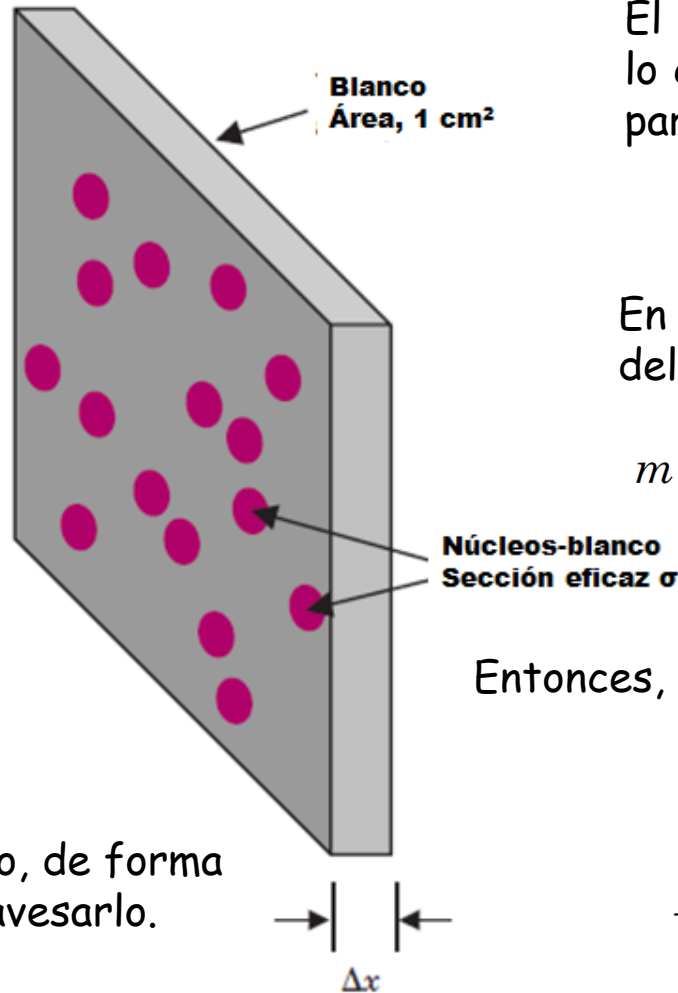
Tasa de activación

n núcleos/cm³.
El número de blancos por
cm² es $n\Delta x$.



Haz de partículas
Flujo Φ
(partículas por unidad
de área y tiempo)

Supondremos un blanco delgado, de forma
tal que el haz no cambia al atravesarlo.



El número de reacciones $\Delta\Phi$ (o
lo que es lo mismo, el número de
partículas removidas del haz) es:

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

En función de la masa atómica
del blanco (AW : peso atómico):

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

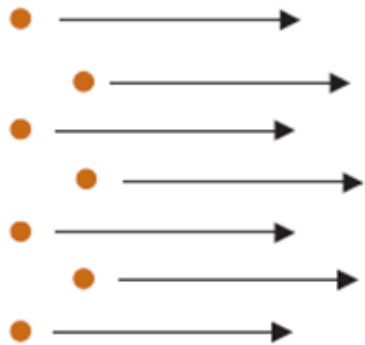
Entonces, la tasa de activaciones es:

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

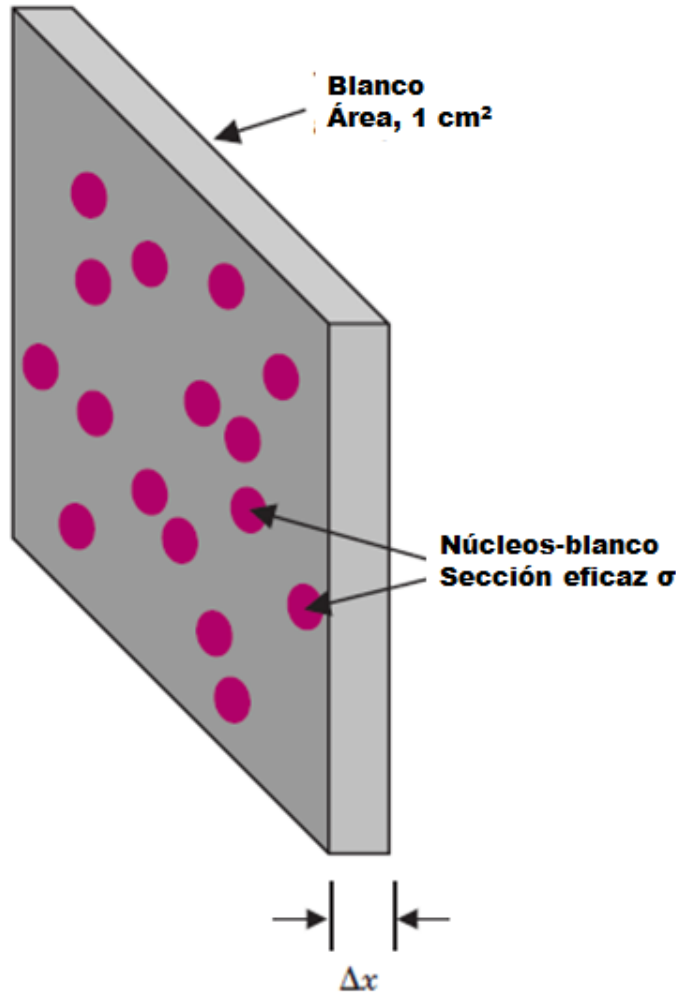
$$R \approx \frac{(6.023 \times 10^{22}) \times \sigma \times \phi}{AW}$$

Tasa de activación

Usualmente, Φ en el rango $10^{12} - 10^{14}$ partículas/s.cm²

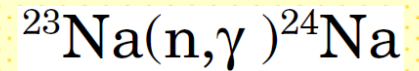


Haz de partículas
Flujo Φ
(partículas por unidad de área y tiempo)



$$R \approx \frac{(6.023 \times 10^{22}) \times \sigma \times \phi}{AW}$$

Ejemplo
($\Phi=10^{13}$ neutrones/s.cm²)



$$\sigma=0.53 \text{ b}$$

$$R = 1.38 \times 10^{11} \text{ activaciones/g.s}$$

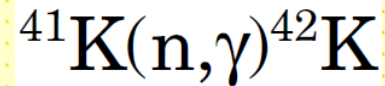


Tasa de activación

$$R \approx \frac{(6.023 \times 10^{22}) \times \sigma \times \phi}{AW}$$

Si en el blanco hay mas de una especie, se debe tener en cuenta la abundancia relativa y la abundancia isotópica del isótopo de interés.

Ejemplo. E ^{42}K se produce a partir de la reacción



K natural: ^{30}K , 93,2%
 ^{41}K , 6.8%

$$\sigma(^{41}\text{K})=1.2 \text{ b}$$

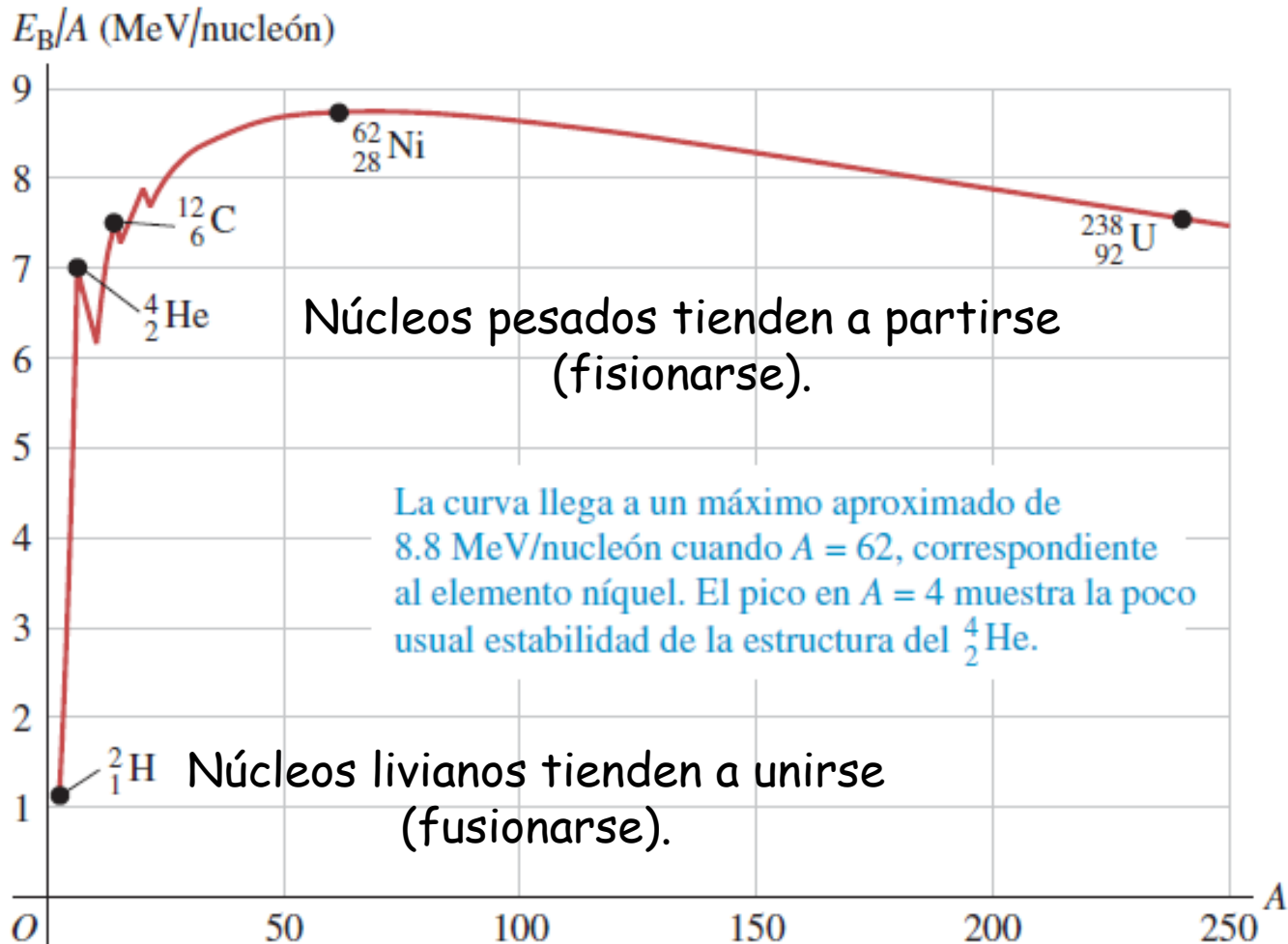
$$R = 1.76 \times 10^{11} \text{ activaciones/g} (^{41}\text{K}) \cdot \text{s}$$

$$R = 0.068 \times 1.76 \times 10^{11} = 1.20 \times 10^{10} \text{ activaciones/g} \cdot \text{s}$$

La tasa de activación son menores a las predichas si el blanco tiene un espesor tal que produce atenuación del haz.

En el caso que los proyectiles sean partículas cargadas, las mismas pierden energía al atravesar el blanco, por lo cual cambia σ .

Fisión



Núcleos pesados tienden a partirse (fisionarse).

La curva llega a un máximo aproximado de 8.8 MeV/nucleón cuando $A = 62$, correspondiente al elemento níquel. El pico en $A = 4$ muestra la poca usual estabilidad de la estructura del ${}^4_2\text{He}$.

Núcleos livianos tienden a unirse (fusionarse).



Fisión

- Proceso de desintegración en el que un núcleo inestable se divide en dos fragmentos.

1938, experimentos de Otto Hahn y Fritz Strassman

- Bombardeo de U ($Z=92$) con neutrones. La radiación que resultaba no coincidió con la de algún nucleído radioactivo conocido.

Análisis químicos meticulosos mostraron que habían encontrado un isótopo radiactivo del bario ($Z=56$). Después también se encontró kriptón radiactivo ($Z=36$).

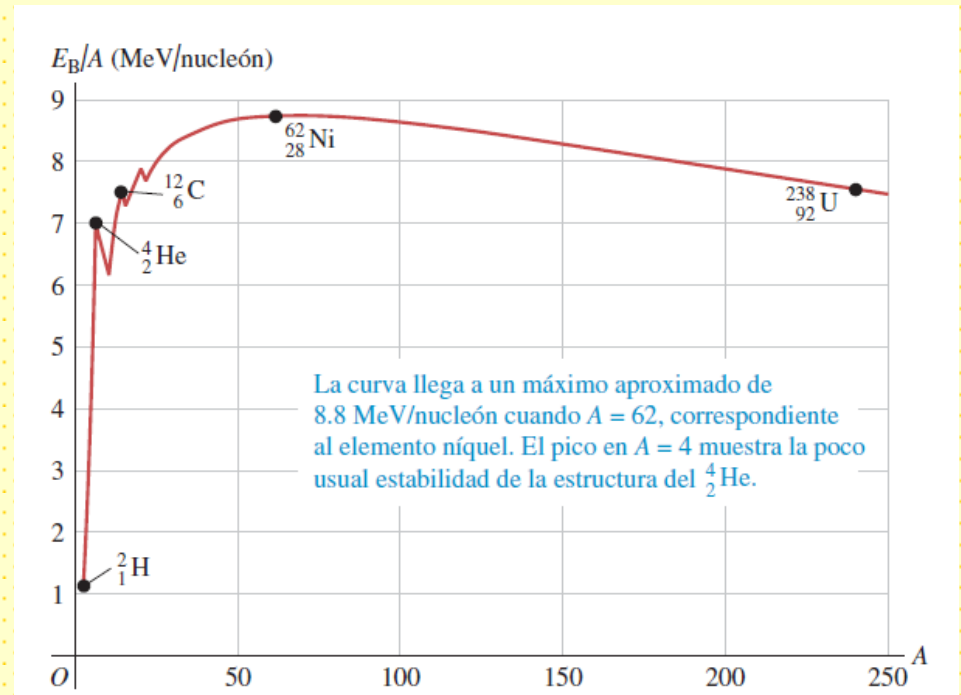
Lise Meitner y Otto Frisch interpretaron estos resultados como que los núcleos de U se estaban dividiendo en dos fragmentos masivos (**fragmentos de fisión**). Dos o tres neutrones aparecen, normalmente junto con los fragmentos de fisión, y sólo en ocasiones aparece un nucleído ligero como el ^3H .

Fisión

$A > 60$: las reacciones de fisión liberan energía.

La energía de enlace por nucleón disminuye en función de A , hasta aprox. $A=60$ (moviéndonos hacia el máximo de esta curva, desde el lado de grandes A).

La fisión de un núcleo pesado para formar dos núcleos mas ligeros es una reacción exoérgica.





Fisión

Dos tipos:

Espontánea (natural)

Inducida (por algún «proyectil»).

La fisión espontánea siempre ocurre con vidas medias mayores a 10^6 años. Por lo tanto son muy poco probables

Entre los elementos que sufren fisión espontánea están el ^{235}U y el ^{232}Th (procesos de fisión espontánea pueden detectarse en rocas con contenidos de U y Th).

Se estima que el ^{238}U se fisiona espontáneamente con una vida media del orden de 10^{16} años!

Los proyectiles empleados para inducir la fisión inducida en general son neutrones (por no tener carga eléctrica puede aproximarse al núcleo sin experimentar repulsión, ser absorbido e iniciar el proceso de fisión).



Fisión

Tanto el ^{238}U (abundancia: 99.3%) como el ^{235}U (0.7%), así como algunos otros nucleidos, se pueden dividir con facilidad por bombardeo con neutrones.

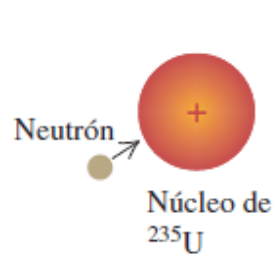
- El ^{235}U con neutrones con energía cinética menor que 1 eV
- El ^{238}U sólo con neutrones rápidos con una energía mínima aproximada de 1 MeV.

Cuando el ^{235}U absorbe un neutrón, el nucleído que resulta $^{236}\text{U}^*$ se divide en dos fragmentos, casi en forma instantánea.

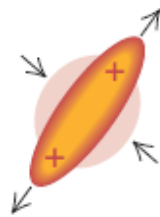
(En sentido estricto, es el $^{236}\text{U}^*$ y no el ^{235}U el que se fisiona, pero se acostumbra hablar de fisión del ^{235}U).

Fisión

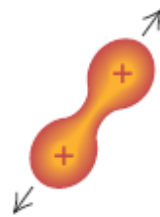
a) Un núcleo de ^{235}U absorbe un neutrón.



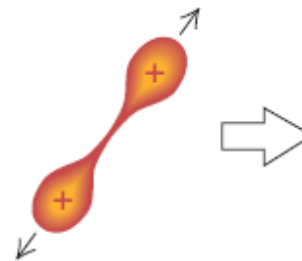
b) El núcleo resultante, $^{236}\text{U}^*$ se encuentra en un estado muy excitado y oscila fuertemente.



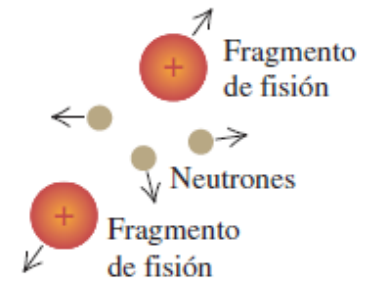
c) Se desarrolla un cuello y la repulsión eléctrica divide a los dos lóbulos.



d) Los dos lóbulos se separan, formando fragmentos de fisión.



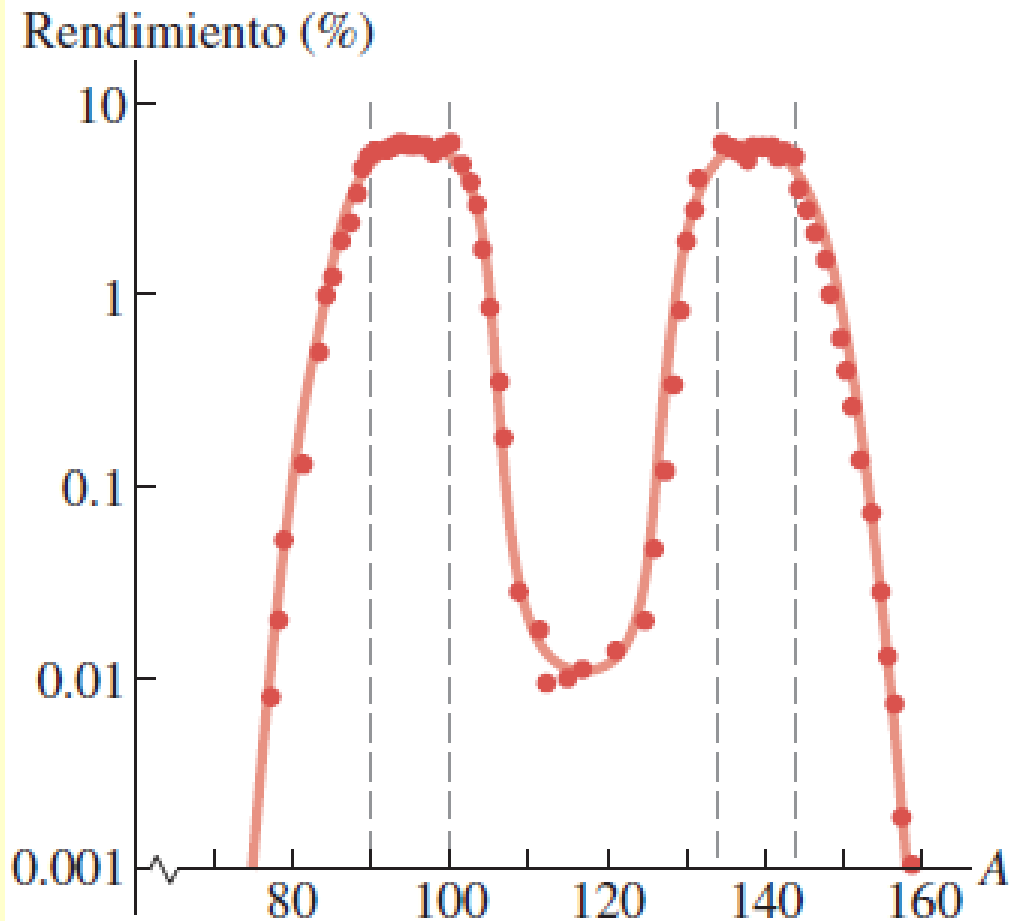
e) Los fragmentos emiten neutrones en el momento de la fisión o algunos segundos después.



La división en dos fragmentos es un proceso estocástico que produce diversos en cada fisión con una ley de probabilidad que depende de A .

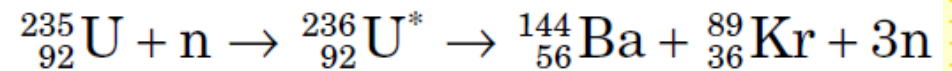
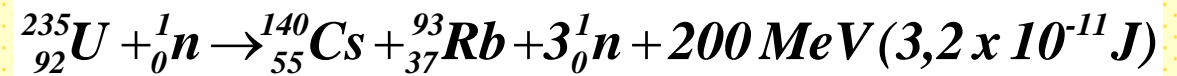
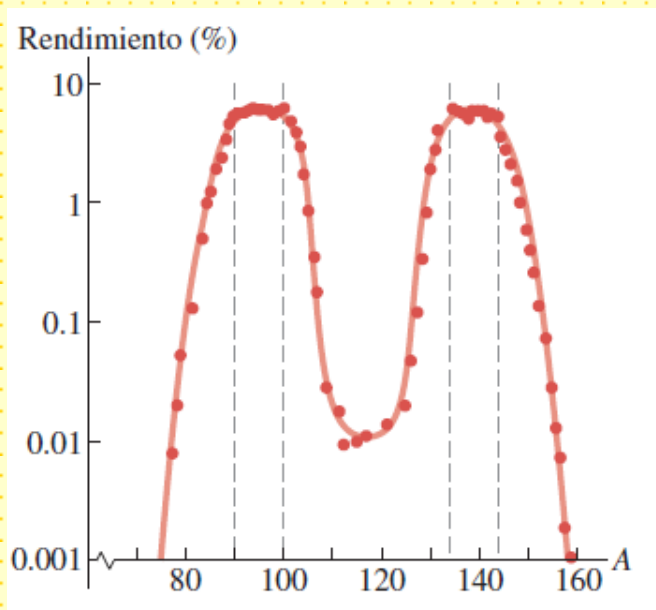
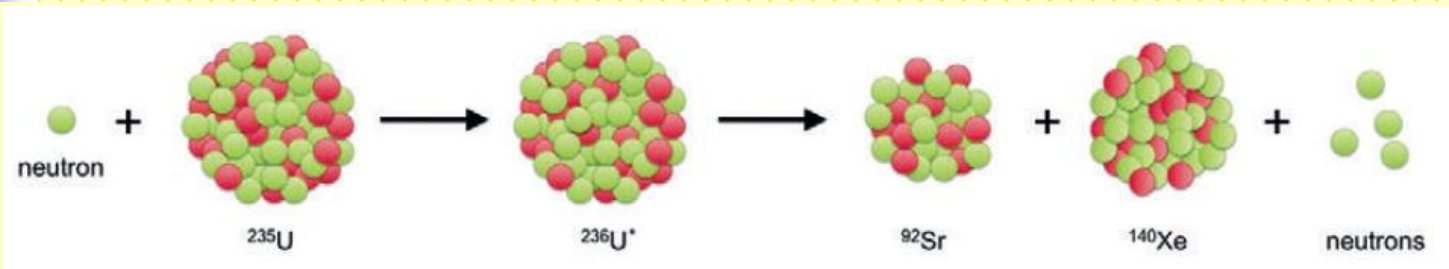
Esta ley de partición es asimétrica: fragmento con A bajo y otro con A alto, ambos con alta energía cinética.

Fisión



Se han encontrado entre los productos de fisión más de 100 nucleídos, que representan a más de 20 elementos. La mayor parte de los fragmentos tienen números de masa de 90 a 100 y de 135 a 145.

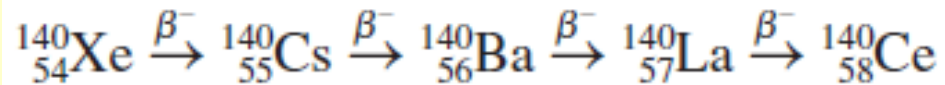
Fisión





Fisión

Los fragmentos de la fisión siempre tienen demasiados neutrones para ser estables. En general sufren una serie de decaimientos β^- hasta que se llega a un valor estable de N/Z.

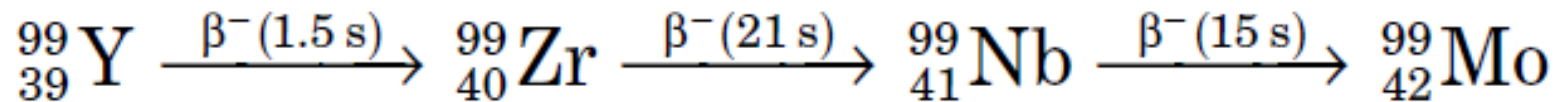


Si uno de los elementos de la cadena de decaimiento tiene una semivida lo suficientemente larga puede ser extraído de los productos de fisión y usado en Medicina Nuclear.

Veamos un ejemplo.



Fisión



La semivida del ${}^{99}\text{Mo}$ es 65.9 h, lo suficientemente larga como para ser separado por procesos químicos de los restantes fragmentos de fisión.

Este isótopo es muy importante en Física Médica, ya que su hijo ${}^{99\text{m}}\text{Tc}$ es el radionucleido más comúnmente empleado en Medicina Nuclear.

Otros productos de fisión con empleo en Medicina Nuclear son ${}^{131}\text{I}$ y ${}^{133}\text{Xe}$.



Fisión

Los radionucleidos producidos por fisión tienen las siguientes características:

- Tienen un exceso de neutrones. Entonces, decaen por emisión β^- .
- Son portadores libres (no hay involucrado isótopos estables del elemento). Esto implica alta actividad específica de radioisótopo.
- La fisión no es específica. Se forman del orden de 100 elementos, por lo cual el rendimiento del radioisótopo de interés es bajo.

Fisión

La energía liberada en la fisión es del orden de 200 MeV
(comparar con las energías típicas de alfas y betas, de unos cuantos MeV).

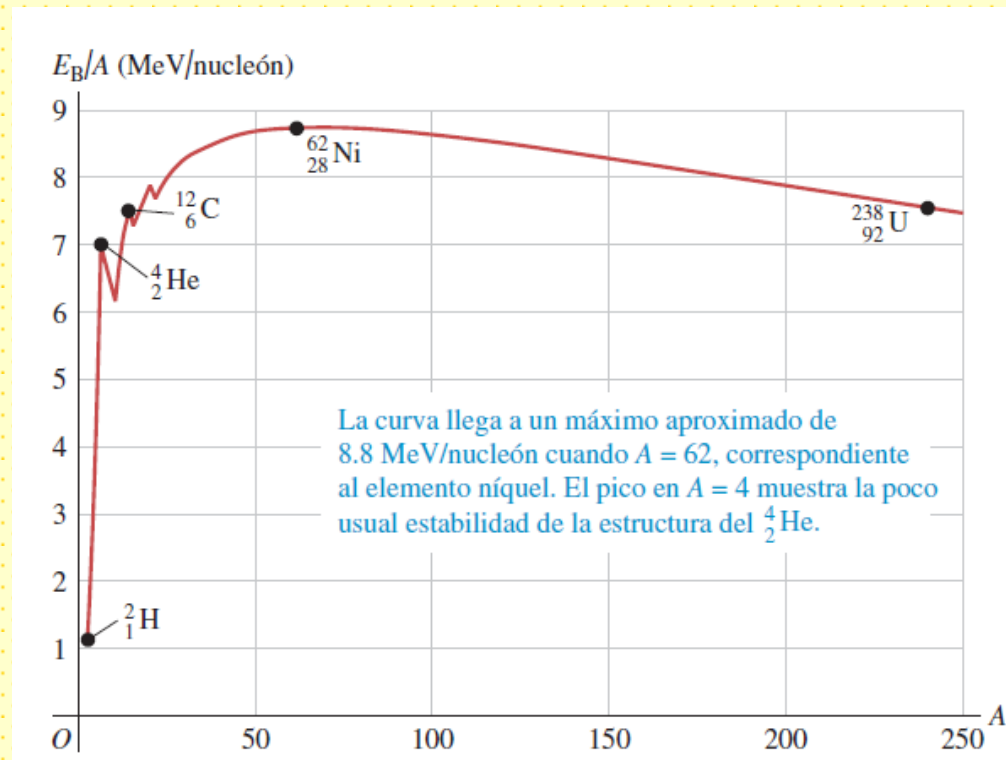
La razón es que la energía de enlace promedio por nucleón es:

~7.6 MeV para $A=240$,

~8.5 MeV para $A=120$.

En consecuencia, una estimación aproximada del aumento esperado en la energía de enlace durante la fisión es

$8.5 \text{ MeV} - 7.6 \text{ MeV} = 0.9 \text{ MeV}$ por nucleón, aproximadamente.





Reacción en cadena, masa crítica y reactores

El ^{235}U se fisiona naturalmente con una semivida de 7×10^8 años., dividiéndose en dos fragmentos de fisión mas livianos y emitiendo 2 o 3 neutrones.

La fisión de un núcleo de U, iniciada por bombardeo de neutrones, libera otros neutrones que pueden iniciar más fisiones, sugiriendo la posibilidad de una reacción en cadena.

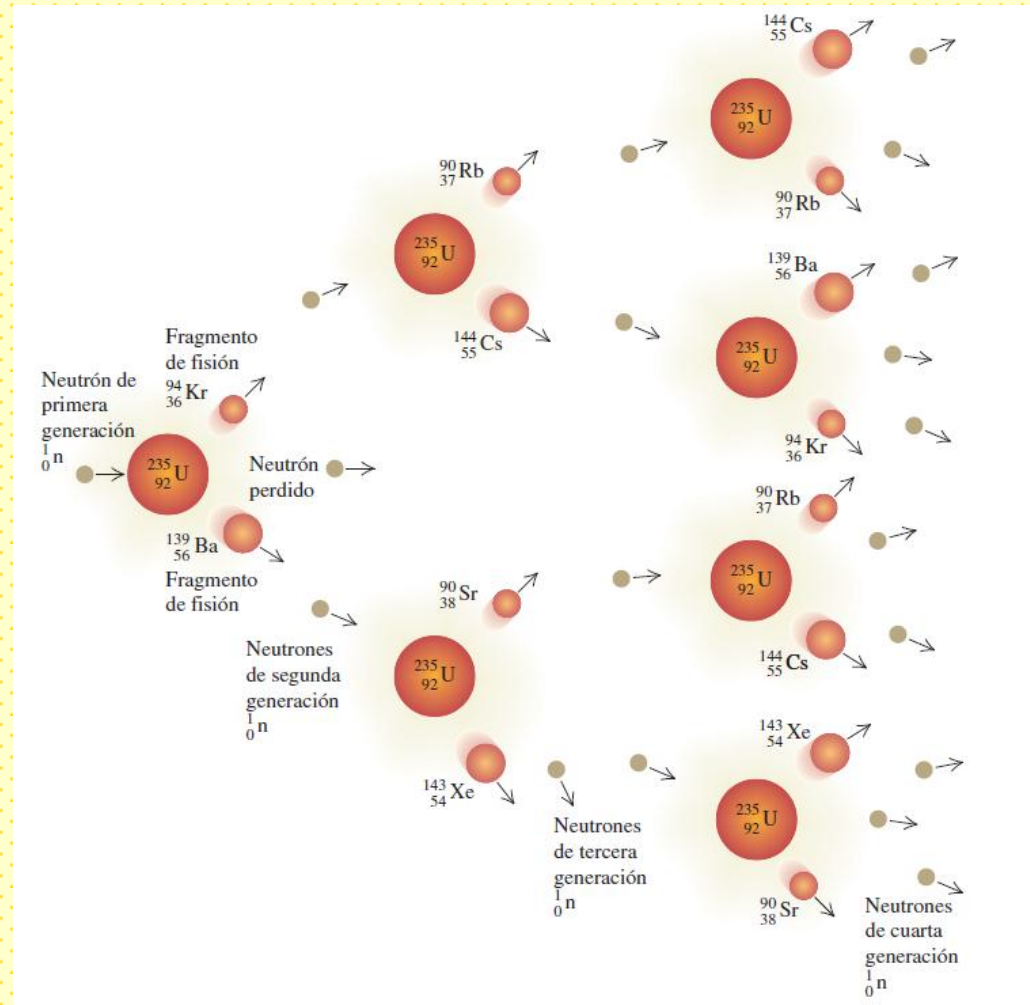
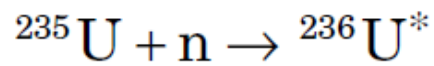
Puede hacerse que la reacción en cadena proceda «lentamente» y en forma controlada en un reactor nuclear, o en forma explosiva y sin control en una bomba.

Los neutrones tienen mayor probabilidad de producir fisión de un material fisil que de ser absorbido en una reacción improductiva.

- Baja proporción del isótopo fisil \Rightarrow los neutrones serán absorbidos por isótopos no fisionables o escaparán del material sin interactuar.

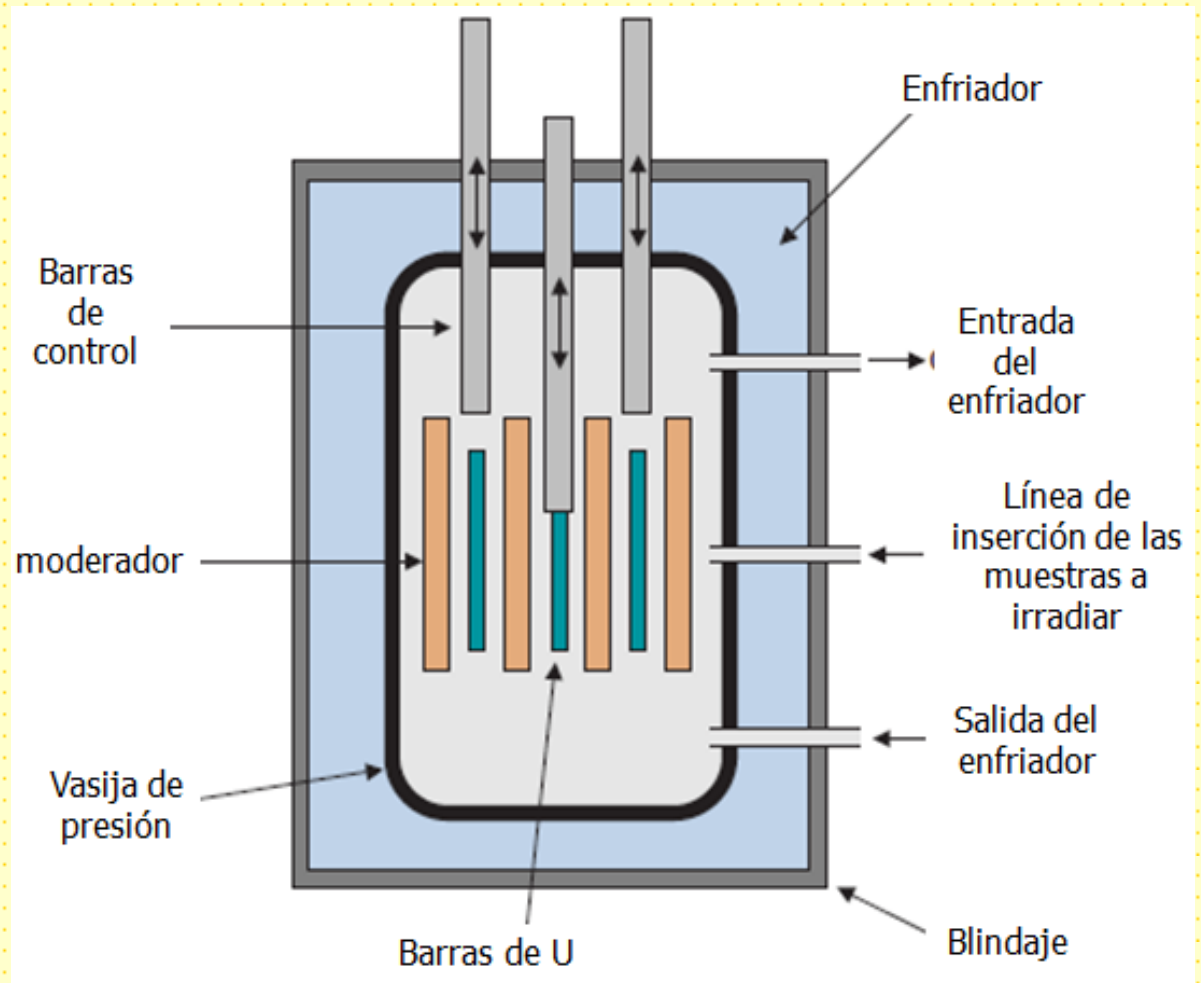
- Alta proporción de isótopos fisiles y el material es lo suficientemente grande y compacto \Rightarrow *masa crítica* \Rightarrow reacción en cadena autosostenida.

Reacción en cadena, masa crítica y reactores

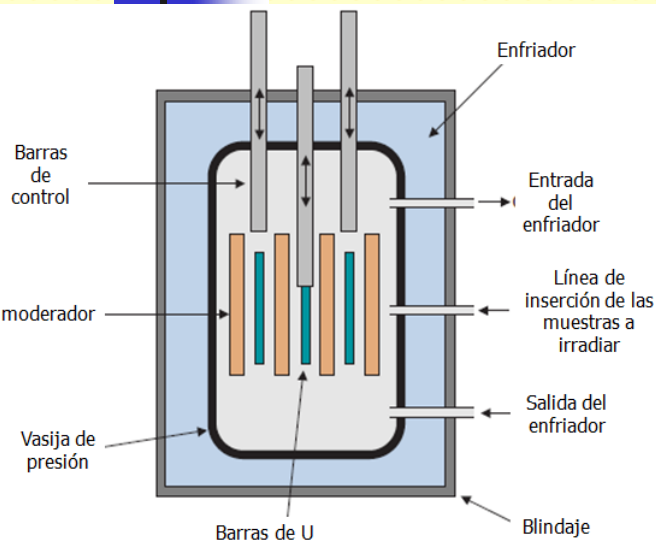


Reacción en cadena, masa crítica y reactores

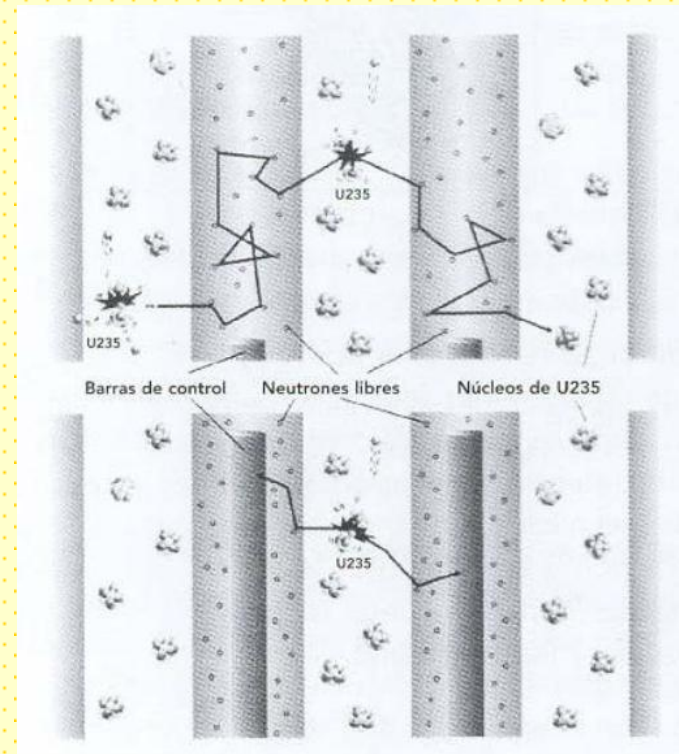
Reactor nuclear



Reacción en cadena, masa crítica y reactores

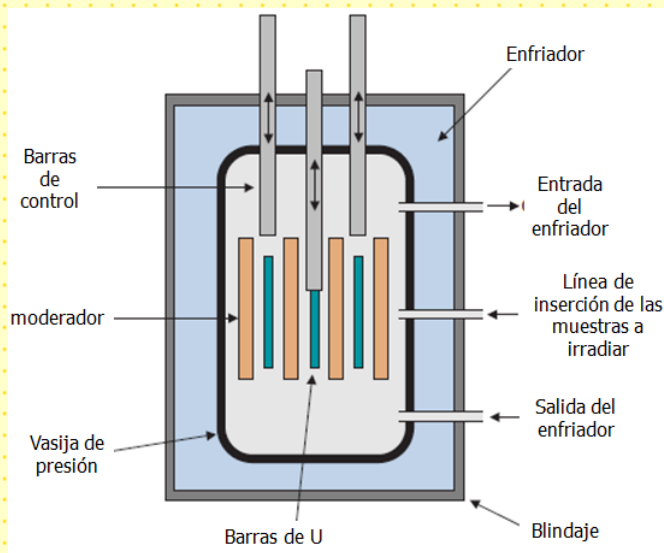


La función del moderador es bajar la velocidad (energía) de los neutrones hasta la energía térmica y así iniciar mas eventos de fisión.
En general, agua pesada o grafito.



Las barras de control exponen o blindan las barras de U.
Contienen un material que absorbe neutrones sin fisionarse (Cd o B). Las barras de control «estimulan» o «apagan» la reacción en cadena.

Reacción en cadena, masa crítica y reactores



En cada fisión se liberan 200-300 Mev en general en forma de calor. Se puede usar para, por ejemplo, para generar electricidad (planta nuclear).

Los radionucleidos de interés se producen o bien como productos de fisión (lo acabamos de ver) o bien al irradiar una muestra con los neutrones que se producen (activación neutrónica, lo veremos en breve).

Uno u otro método se usa dependiendo del producto a obtener y la actividad requerida.

Reacción en cadena, masa crítica y reactores



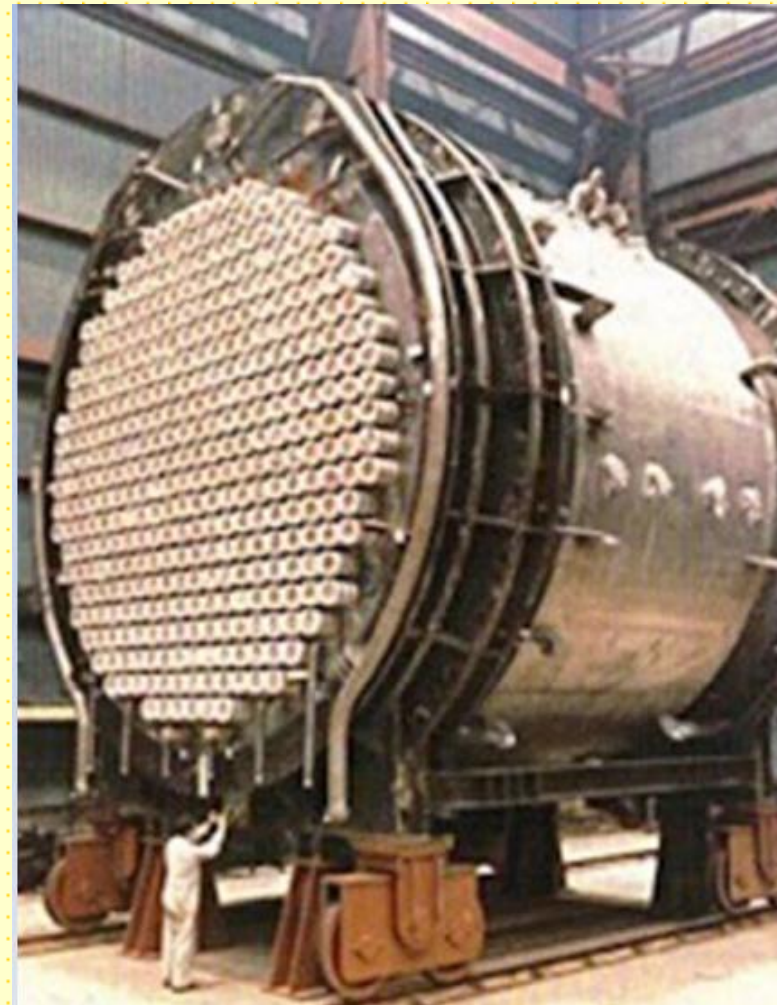
Representación del primer reactor nuclear del mundo. Debido al secreto de guerra, existen pocas fotografías del reactor completo, que es taba compuesto de capas de grafito (moderador) intercaladas con U. El 2/12/1942 se logró una reacción en cadena autosostenida. El aviso de este éxito fue telefonea do de inmediato a Washington con este mensa je: "El navegante italiano ha aterrizado en el nuevo mundo y encontró muy amables a los nativos".

El histórico evento tuvo lugar en un laboratorio improvisado en una cancha de frontón bajo las tribunas del Campo Stagg de la universidad de Chicago, y el navegante italiano era Enrico Fermi.



Reacción en cadena, masa crítica y reactores

El 20 de diciembre de 1951 un reactor nuclear generó por primera vez electricidad cuando el reactor de ensayos EBR-I (1er reactor experimental reproductor, con Pu como combustible) en US encendió cuatro bombitas. Fue desactivado en 1964.





Reacción en cadena, masa crítica y reactores

Algún comentario adicional.

La liberación de energía en una reacción nuclear en cadena es mucho mayor que en cualquier reacción química.

Cuando el uranio se "quema" y forma dióxido de uranio en la reacción química:



el calor de combustión aproximado es de unos **11 eV por átomo**.

La fisión libera unos **200 MeV** por átomo, unas 20 millones de veces más energía.



Reacción en cadena, masa crítica y reactores

El isótopo ^{238}U también puede absorber neutrones, transformándose en $^{239}\text{U}^*$, pero con una probabilidad extremadamente baja, por lo que no puede sostener por sí una reacción en cadena.

Por eso, el uranio que se usa en los reactores se "enriquece" aumentando la proporción del ^{235}U con respecto al valor natural del 0.7% (hasta un 3% aprox.)



Reacción en cadena, masa crítica y reactores

Pregunta:

¿Qué masa de ^{235}U se debe fisiónar cada día para dar 3000 MW de potencia térmica?

- Sabemos que por cada fisión se generan del orden de 200 MeV/átomo.
 - Potencia: 3000 MJ (3000×10^6 J)/segundo.

De esto, se obtiene que en un día (86,400 s) **el consumo total de ^{235}U es 3.2 kg.**

En comparación, una central eléctrica de 1000 MW alimentada con carbón quema **10,600 toneladas de carbón icada día!**

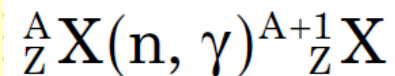
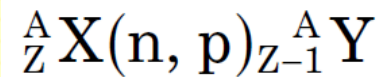


Activación neutrónica

Al no tener carga, los neutrones no son atraídos o repelidos por el núcleo.

El neutrón puede ser capturado por el núcleo-blanco, dando lugar a una reacción nuclear y por ende a un radioisótopo.

Dos tipos de reacciones generalmente ocurren:





Activación neutrónica

Ya habíamos visto que en el caso de un decaimiento en cadena $A \xrightarrow{\lambda_{BA}} B \xrightarrow{\lambda_B} C$

Se obtenía:

$$A_B(t) = \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} \lambda_B N_{A0} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t})$$

Para una reacción de activación neutrónica que da lugar a un radioisótopo: $A \xrightarrow{??} B \xrightarrow{\lambda_B} C$

Si hallamos un equivalente a λ_A , tendríamos el problema resuelto. Supongamos un flujo de irradiación Φ y un blanco con sección eficaz σ .

$\Phi\sigma$ tiene unidades de $1/s$, es decir las unidades de la constante de desintegración λ .

Tomaremos entonces que $\Phi\sigma$ juega el papel de λ_A .



Activación neutrónica

$$A_B(t) = \frac{\Phi\sigma}{\lambda_B \left(1 - \Phi\sigma/\lambda_B\right)} \lambda_B N_{A0} \left(e^{-\Phi\sigma t} - e^{-\lambda_B t}\right)$$

Dados los valores usuales de Φ (10^{-12} part./m².s) y σ (10^{-28} m²) $\Phi\sigma \ll \lambda_A$. Entonces:

$$A_B(t) = \frac{\Phi\sigma}{\cancel{\lambda_B} \left(1 - \cancel{\Phi\sigma}/\cancel{\lambda_B}\right)} \cancel{\lambda_B} N_{A0} \left(e^{-\cancel{\Phi\sigma} t} - e^{-\lambda_B t}\right)$$

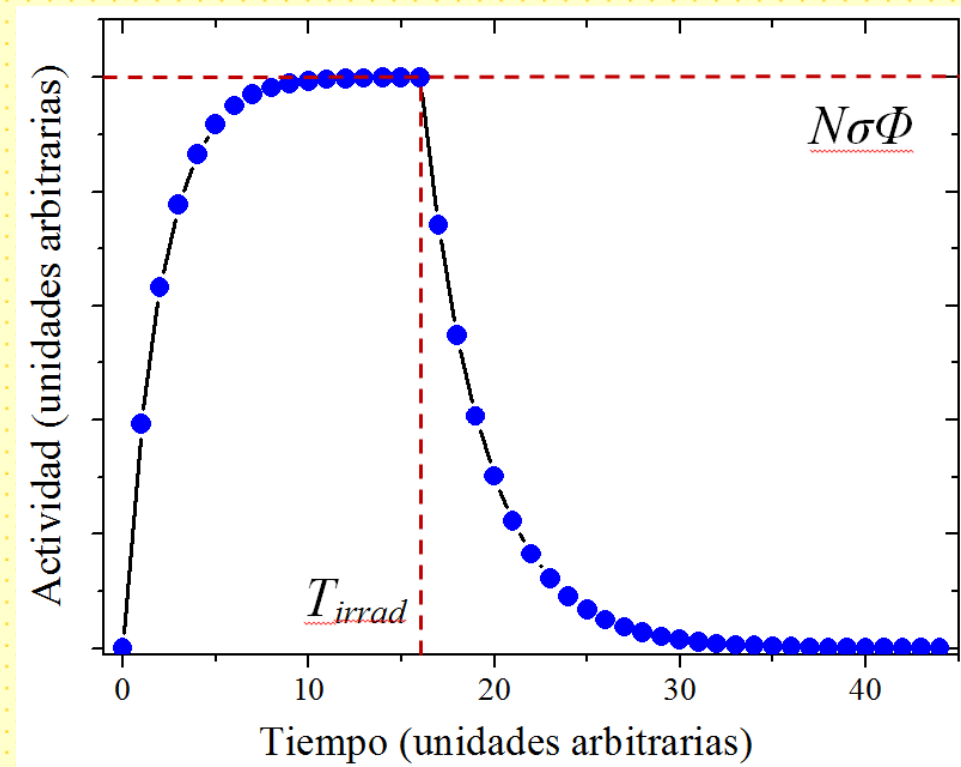
$$A_B(t) = \Phi\sigma N_{A0} \left(1 - e^{-\lambda_B t}\right)$$

Activación neutrónica

$$A_B(t) = \Phi\sigma N_{A0} \left(1 - e^{-\lambda_B t}\right)$$

Máxima actividad (se obtiene para tiempos suficientemente largos comparados con $1/\lambda_A$).

El término $\Phi\sigma$ implica que el número de activaciones es una ínfima fracción del número de blancos. Baja actividad del radioisótopo.





Activación neutrónica

Radionucleidos de importancia en Medicina Nuclear obtenidos por activación neutrónica

Radionuclide	Decay Mode	Production Reaction	Natural Abundance of Target Isotope (%)*	$\sigma_c(\text{b})^\dagger$
^{14}C	β^-	$^{14}\text{N}(\text{n,p})^{14}\text{C}$	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
		$^{32}\text{S}(\text{n,p})^{32}\text{P}$	95.0	0.1
^{35}S	β^-	$^{35}\text{Cl}(\text{n,p})^{35}\text{S}$	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



Activación neutrónica

Los radionucleidos producidos por activación neutrónica tienen las siguientes características:

- Dado que la reacción consiste en «añadir» un neutrón, tienden a decaer por emisión β^- .
- Baja actividad del producto obtenido.
- Dado que sólo una muy pequeña fracción de blancos se activan ($1/10^6$ - $1/10^9$), hay una alta fracción de isótopos estables en el producto. No están libres de portadores, baja actividad específica.



Activación mediante aceleradores

Los aceleradores de partículas se usan para acelerar partículas livianas como protones, ^2H y partículas α a altas energías.

Al colisionar contra un blanco pueden producir reacciones nucleares que llevan a la formación de radionucleidos de manera similar a la activación neutrónica.

Para vencer la repulsión coulombiana deben tener altas energías, del orden de 10-20 MeV.

Tipos de aceleradores:

- van der Graff
- Aceleradores lineales
- Diferentes tipos de ciclotrones (el más ampliamente empleado para producir radionucleidos para uso en medicina).

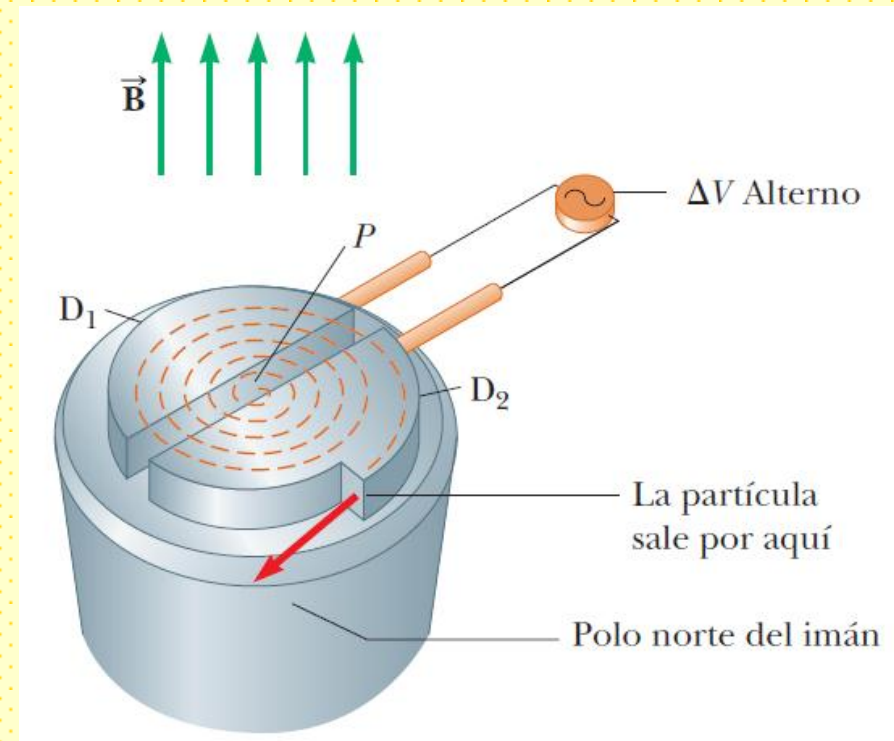
Activación mediante aceleradores

Esquema básico de un ciclotrón.

$$K = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m}$$

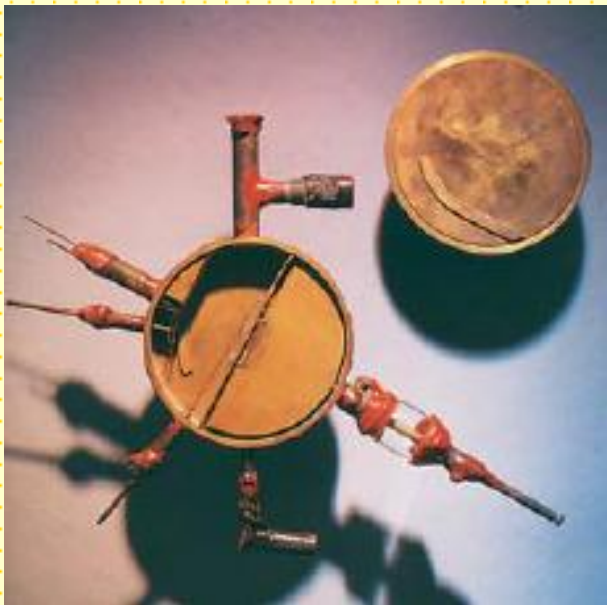
$$E(\text{MeV}) = 4.8 \times 10^{-3} \frac{(B \times R \times Z)^2}{A}$$

Con B en T, R es el radio de la órbita en cm y Z y A los números atómicos y másicos (carga y masa).

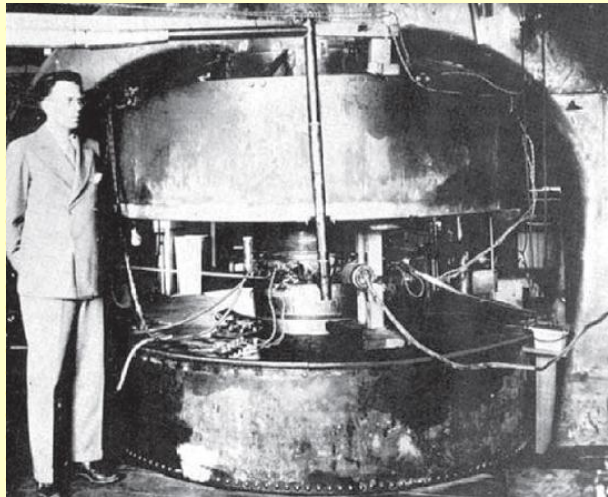


En ciclotrones de usos biomédicos, B es del orden de 1.5 T. para un diámetro de unos 80 cm, protones y α son acelerados a unos 15 MeV y ^2H a unos 8 MeV.

Activación mediante aceleradores



Primer ciclotrón, inventado por E. O. Lawrence y M. S. Livingston en 1934.



Ernest O. Lawrence junto a su ciclotrón, Berkeley, California.





Activación mediante aceleradores

Los radionucleidos producidos mediante aceleradores tienen las siguientes características:

- En general, los radionucleidos obtenidos decaen por emisión β^+ o C.E.
- Usualmente son libres de portadores.
- Muy baja actividad (debido a que σ es menor para partículas cargadas que para neutrones).
Los productos obtenidos mediante ciclotrón son más caros que los obtenidos mediante reactores.
- Los radionucleidos obtenidos son de amplio interés en estudios mediante imágenes por la emisión de partículas γ y rayos X.

Activación mediante aceleradores

Product	Decay Mode	Common Production Reaction	Natural Abundance of Target Isotope* (%)	Energy Threshold (MeV) [†]
¹¹ C	β ⁺ , EC	¹⁴ N(p,α) ¹¹ C	<i>T_{1/2} = 20 m</i> 99.6	3.1
		¹⁰ B(d,n) ¹¹ C	19.9	0
¹³ N	β ⁺	¹⁶ O(p,α) ¹³ N	<i>T_{1/2} = 10 m</i> 99.8	5.5
		¹² C(d,n) ¹³ N	98.9	0.35
¹⁵ O	β ⁺	¹⁴ N(d,n) ¹⁵ O	<i>T_{1/2} = 2 m</i> 99.6	0
		¹⁵ N(p,n) ¹⁵ O	0.37	—
¹⁸ F	β ⁺ , EC	¹⁸ O(p,n) ¹⁸ F	0.20	2.57
		²⁰ Ne(d,α) ¹⁸ F	90.5	0
⁶⁷ Ga	(EC,γ)	⁶⁸ Zn(p,2n) ⁶⁷ Ga	18.8	5.96
¹¹¹ In	(EC,γ)	¹⁰⁹ Ag(α,2n) ¹¹¹ In	48.2	—
		¹¹¹ Cd(p,n) ¹¹¹ In	12.8	—
¹²³ I	(EC,γ)	¹²² Te(d,n) ¹²³ I	2.6	—
		¹²⁴ Te(p,3n) ¹²³ I	4.8	—
²⁰¹ Tl	(EC,γ)	²⁰¹ Hg(d,2n) ²⁰¹ Tl	13.2	—



Activación mediante aceleradores

Los radionucleidos mencionados son constituyentes de moléculas y sustancias biológicas y pueden ser usados entonces como marcadores.

- Por su corta vida media deben ser preparados in situ con un ciclotrón destinado a este fin.
- El alto costo de adquisición y operación de estas máquinas dificulta su uso generalizado.
- Sin embargo, debido a la importancia de varios radiofármacos con marcadores emisores de positrones, hay varios cientos de ciclotrones en todo el mundo produciéndolos.



Activación mediante aceleradores

- ^{18}F es otro radionucleido emisor de positrones de importancia.
- Una de sus principales aplicaciones es en el etiquetado de un análogo de glucosa, la fluorodesoxiglucosa (FDG), que permitiendo estudiar el metabolismo de la glucosa en las células del cuerpo.
- ^{18}F -FDG es ampliamente utilizado en una amplia gama de aplicaciones clínicas para el estudio del corazón, el cerebro y especialmente en imágenes de tumores cancerígenos.
- La vida media más larga del ^{18}F (110 m) permite que la ^{18}F -FDG pueda ser producida en centros de distribución regional y enviado a hospitales a unos cientos de km de distancia.



Radionucleidos en Medicina Nuclear

En su forma elemental, los radionucleidos tienen un rango de interés médico muy limitado.

Ejemplo: ^{131}I en forma de ion puede tener interés para el estudio del funcionamiento de la tiroides (acumulación de I) o para terapia del cáncer de tiroides. Pero no más que esto.

En Medicina Nuclear se emplean radiofármacos, en los cuales se incorpora el radionucleido como «marcador» (el ejemplo anterior de ^{18}F -FDG).

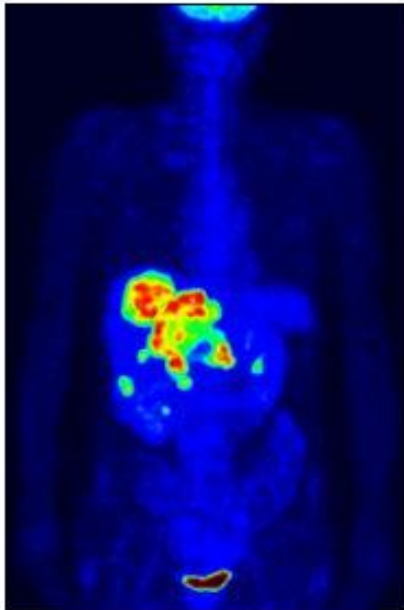
Radionucleidos en Medicina Nuclear



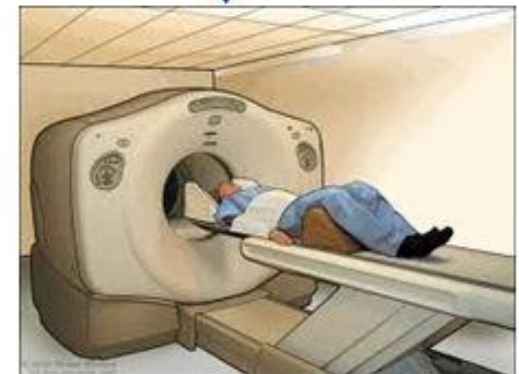
El radiofármaco es preparado y administrado al paciente, generalmente por vía intravenosa



La radiación emitida es medida externamente al paciente con equipamiento adecuado



El patrón de distribución de la actividad en el órgano en estudio permite diagnosticar diversas patologías





Radionucleidos en Medicina Nuclear

En principio, cualquier radionucleido podría usarse en Medicina Nuclear, tanto en forma elemental como marcador en un radiofármaco.

Para poder ser empleado, un radionucleido debe cumplir ciertos requerimientos prácticos.

Radionucleidos en Medicina Nuclear

Radionuclide	Decay Mode	Principal Photon Emissions	Half-Life	Primary Use
¹¹ C	β^+	511 keV	20.4 min	Imaging
¹³ N	β^+	511 keV	9.97 min	Imaging
¹⁵ O	β^+	511 keV	2.03 min	Imaging
¹⁸ F	β^+	511 keV	110 min	Imaging
³² P	β^-	—	14.3 d	Therapy
⁶⁷ Ga	EC	93, 185, 300 keV	3.26 d	Imaging
⁸² Rb	β^+	511 keV	1.25 min	Imaging
⁸⁹ Sr	β^-	—	50.5 d	Therapy
^{99m} Tc	IT	140 keV	6.02 hr	Imaging
¹¹¹ In	EC	172, 247 keV	2.83 d	Imaging
¹²³ I	EC	159 keV	13.2 hr	Imaging
¹²⁵ I	EC	27-30 keV x rays	60.1 d	In vitro assays
¹³¹ I	β^-	364 keV	8.04 d	Therapy/ imaging
¹⁵³ Sm	β^-	41, 103 keV	46.7 hr	Therapy
¹⁸⁶ Re	β^-	137 keV	3.8 d	Therapy
²⁰¹ Tl	EC	68-80 keV x rays	3.04 d	Imaging

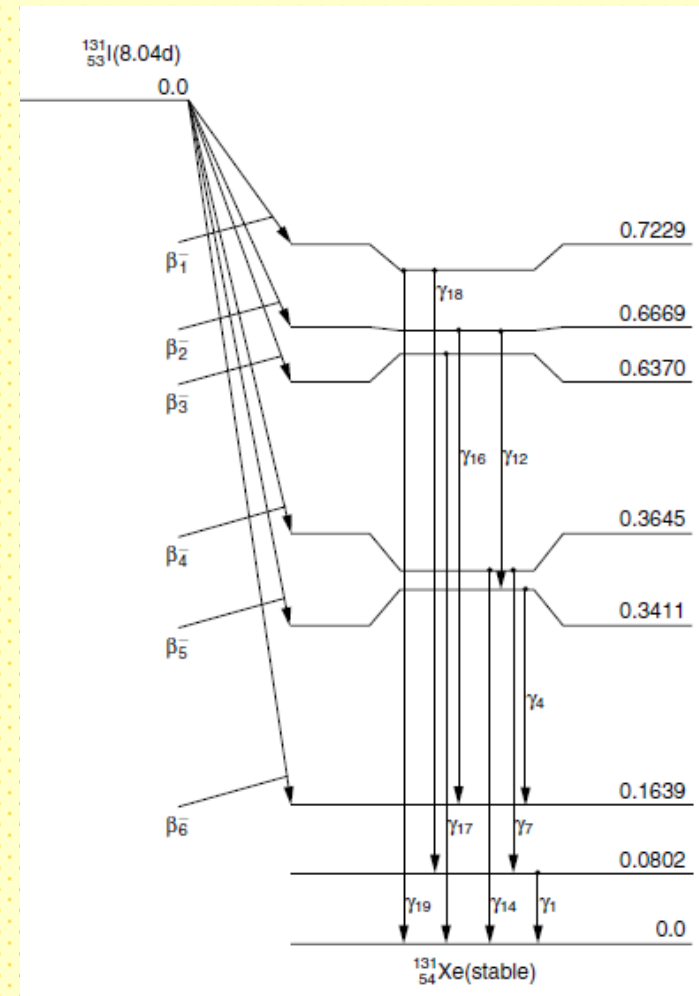
Radionucleidos en Medicina Nuclear

Requerimientos:

- Energía y tipo de la emisión.

Para detección externa, los rayos γ o X deben tener una energía mayor a 50 keV para poder atravesar el tejido y llegar al detector.

Rayos γ , X o electrones no «escapan» del cuerpo y contribuyen a una dosis extra de irradiación al paciente.





Radionucleidos en Medicina Nuclear

Requerimientos:

- Vida media física.

En el rango de segundo a días. Mejor aún, de minutos a horas.

Si la vida media es muy corta, no hay tiempo para producción, preparación del radiofármaco, inyección y medida.

Ejemplo: ^{15}O , $T_{1/2}=123$ s.

Limita a elaboración de radiofármacos muy simples como H_2^{15}O o C^{15}O .

Si la vida media es muy larga, la mayor parte de la radiación es emitida fuera de la «ventana temporal» del estudio, dando lugar a una alta dosis de irradiación del paciente. También pueden causar problemas en términos de almacenamiento y eliminación.

Ejemplo: ^{22}Na , ^{60}Co ($T_{1/2}=123$ años, 5 años).

Emiten rayos γ con energía adecuada, pero la larga vida media produce una alta dosis de irradiación al paciente.



Radionucleidos en Medicina Nuclear

Requerimientos:

- **Actividad específica.**

Determina la masa del radiofármaco a ser introducida en el cuerpo del paciente.

El radiofármaco no debe perturbar el sistema en estudio, por lo cual la masa debe ser lo menor posible, mientras que la actividad debe ser alta.

La actividad específica depende de:

- Vida media
- Abundancia isotópica



Radionucleidos en Medicina Nuclear

Requerimientos:

- Pureza del radionucleido.

Fracción de la actividad total que corresponde al radioisótopo de interés.

La contaminación con otros radionucleidos surge en la producción del mismo y puede ser significativo en algunas situaciones.

Aumenta la dosis de radiación para el paciente Pueden afectar y alterar la detección.

Se debe tener en cuenta la vida media de los contaminantes (si es mucho menor que la del radioisótopo de interés, se puede esperar que decaigan).

En el caso del generador $^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}$, la pureza radionucleica debe ser mayor que 99.985%.



Radionucleidos en Medicina Nuclear

Requerimientos:

- Propiedades químicas

Se requiere radionucleidos de elementos que sean fácilmente incorporado en biomoléculas, sin cambiar significativamente sus propiedades bioquímicas.

Ejemplos:

^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , son elementos que se encuentran naturalmente en muchas biomoléculas.

Metales como $^{99\text{m}}\text{Tc}$ y ^{67}Ga también son ampliamente utilizados como marcadores en Medicina Nuclear

Incorporar estos metales en biomoléculas es un desafío, pero se puede lograr por quelación y otras técnicas que buscan "esconder" al metal de los sitios biológicamente activos de la molécula



Radionucleidos en Medicina Nuclear

Requerimientos:

Finalmente, costo, facilidad de producción y facilidad para elaborar el radiofármaco.



Radionucleidos en Medicina Nuclear

Preparación del radiofármaco.

Debido a las consideraciones prácticas discutidas previamente, la cantidad de radionucleidos generalmente utilizados en Medicina Nuclear es relativamente pequeña, menos de una docena,

Por el contrario, el número de compuestos que se utilizan para ser marcados con radioisótopos es mucho más grande y en continuo crecimiento, siendo éste un campo muy activo de investigación.



Radionucleidos en Medicina Nuclear

Actividad específica final del radiofármaco

La actividad específica final de un radiofármaco (NO del radionúclido) queda determinada por las pérdidas en la actividad específica que ocurre en la síntesis química de la radiofármaco

Particularmente importante para isótopos de elementos que tienen alta abundancia natural.

Ejemplo:

Actividad específica máxima para ^{11}C : 3.5×10^8 MBq/ μmol .

Actividad específica de ^{11}C como marcador en radiofármacos: 10^5 MBq/ μmol .

Origen de la diferencia: presencia de C estable en el aire (CO_2) y en los materiales, recipientes de reacción y tubos utilizados en procedimiento de síntesis química.



Radionucleidos en Medicina Nuclear

Pureza radioquímica

Fracción de radiactividad en el radiofármaco que está presente en la forma química deseada.

Las formas químicas no deseada generalmente provienen de reacciones químicas competitivas o descomposición química o por daños por radiación del radiofármaco.

La pureza radioquímica es importante porque la distribución de la fracción no deseada en el cuerpo es generalmente diferente, agregando un fondo a la imagen obtenida en el estudio.

Típicamente, la pureza de los radiofármacos es mayor al 95%. Pureza química

La pureza química también es importante. Usualmente, mayor al 99%. Pureza química



Radionucleidos en Medicina Nuclear

Vida media biológica.

Vida media del radiofármaco en el cuerpo, mas allá de la vida media del radionucleido.

Algunos radiofármacos tienen una metabolización rápida.

Otros circulan en sangre, con una muy lenta absorción en los tejidos de interés.

La velocidad de eliminación del radiofármaco del cuerpo se llama la **vida media biológica**.

Junto con la vida media física de la radionucleido determinan la cantidad de desintegraciones radiactivas que se observarán en una región particular de tejido

Factores importantes para determinar la dosis de radiación a la que el paciente fue expuesto.



Radionucleidos en Medicina Nuclear

Es fundamental que el marcado del radiofármaco se realice con un radionucleido con vida media (física) suficientemente larga como para abarcar el tiempo del proceso biológico.

Ejemplo.

En el caso de anticuerpos, lo tejidos requieren generalmente horas o días antes de ser absorbidos en forma significativa por el tejido en estudio. (y que los niveles en sangre hayan disminuido lo suficiente).

Radionucleidos de corta vida (minutos o menos) no son útiles en esta situación.



Radionucleidos en Medicina Nuclear

El radiofármaco no debe ser tóxico a los niveles de masa administrados.

Debido a la alta actividad específica de la mayoría de radiofármacos, inyecciones típicas de microgramos o nanogramos (en general, para efectos farmacológicos el límite es miligramos).

Todos los radiofármacos deben ser estériles.



Radionucleidos en Medicina Nuclear

Marcado de moléculas.

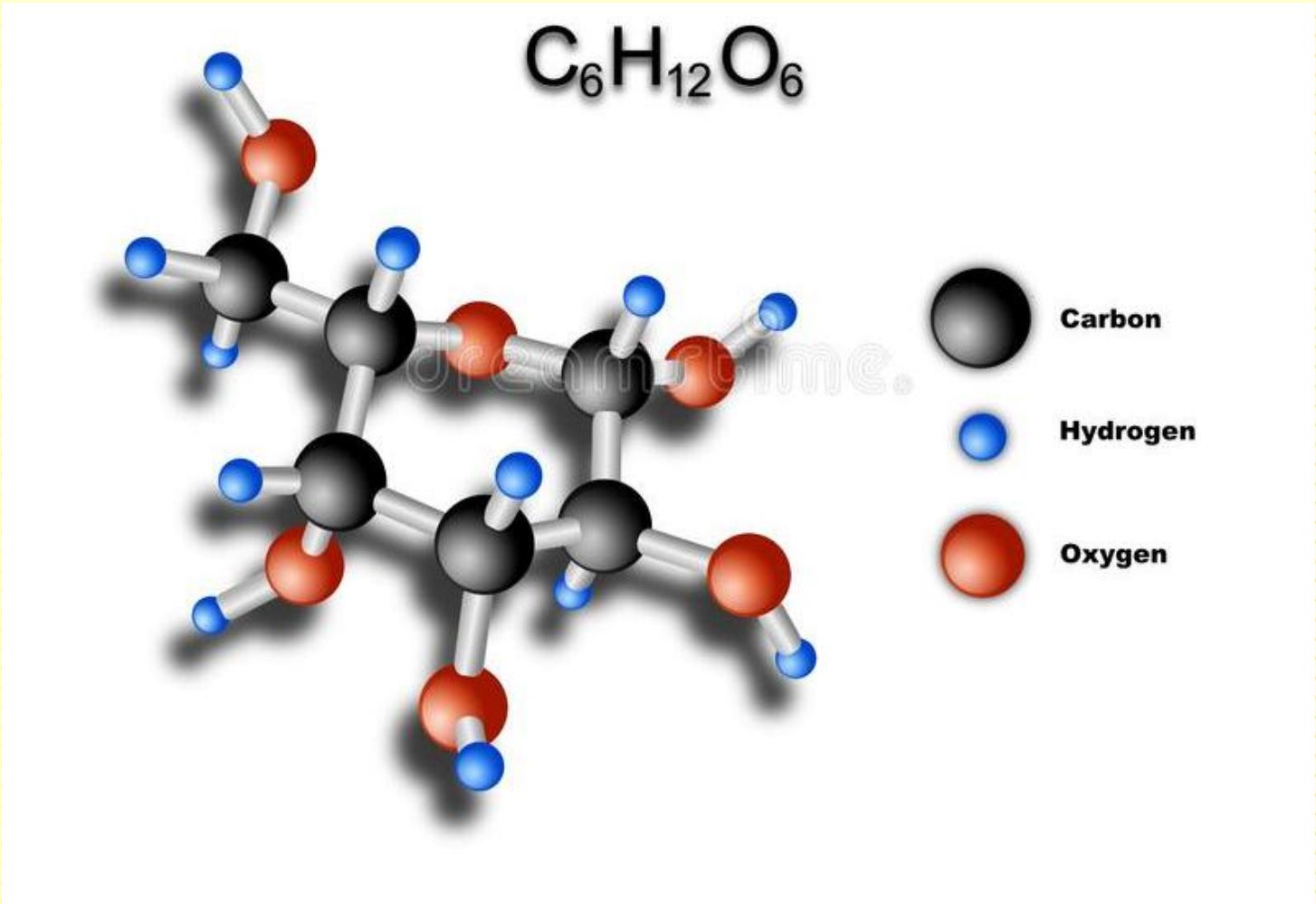
Dos estrategias para el marcado de moléculas pequeñas.

1- Sustitución: un átomo estable de una molécula es reemplazado por un isótopo radiactivo del mismo elemento.

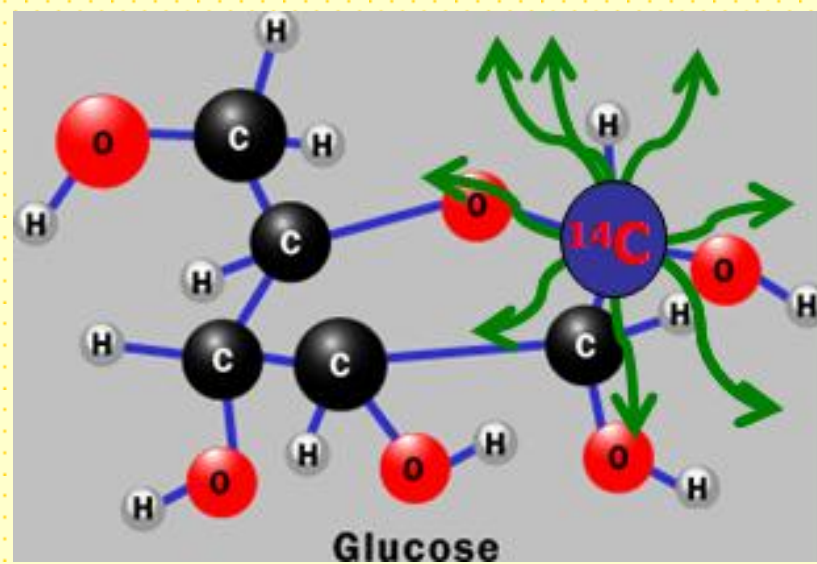
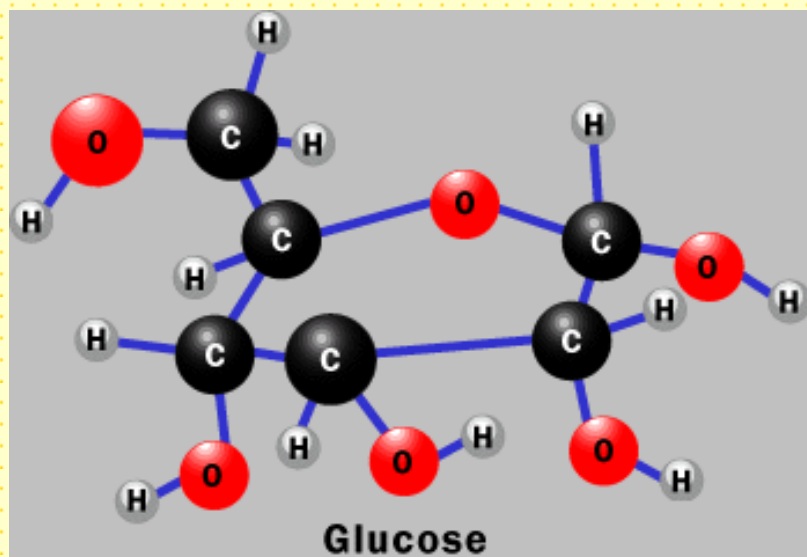
El radiofármaco tiene las mismas propiedades biológicas.
Especialmente útil en el caso de elementos muy abundantes en la naturaleza (O, N, H, C).

Radionucleidos en Medicina Nuclear

Ejemplo. Glucosa.



Radionucleidos en Medicina Nuclear





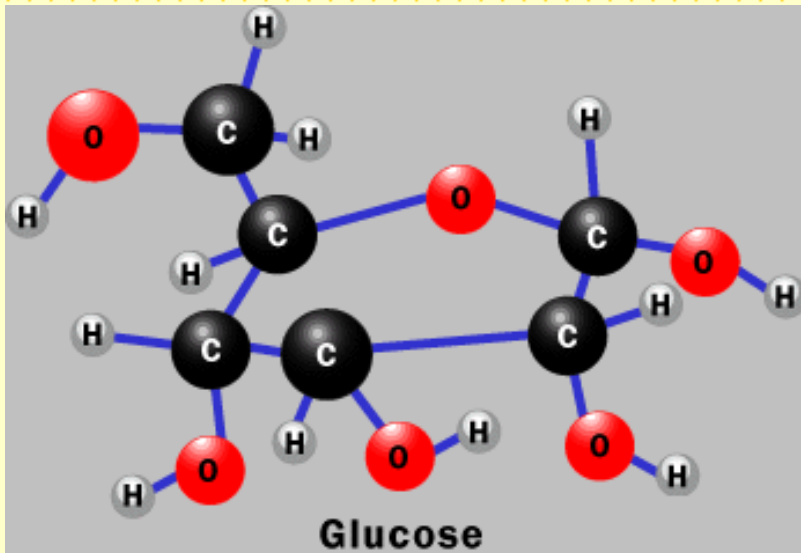
Radionucleidos en Medicina Nuclear

2- Análogos.

Modificar el compuesto original.

De esta forma, se pueden emplear, incluyéndolos en el radiofármaco, elementos de baja abundancia natural, pero con buenas propiedades para su uso en obtención de imágenes médicas.

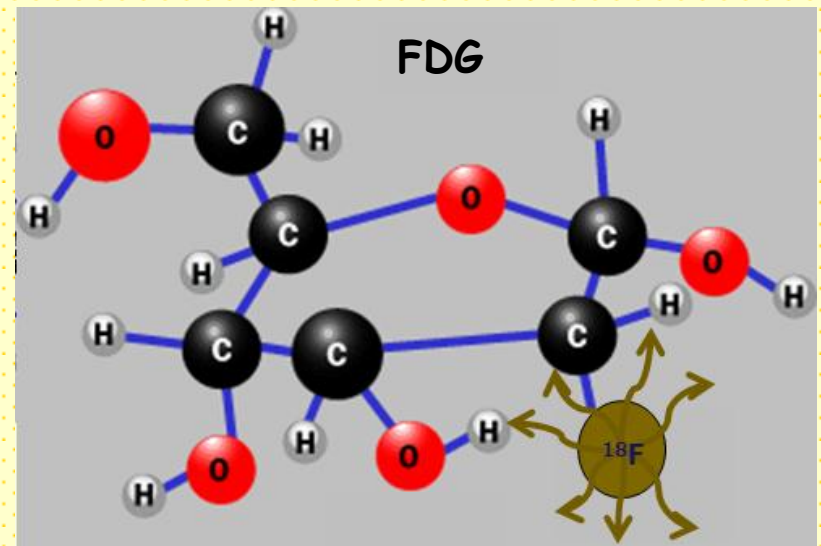
Radionucleidos en Medicina Nuclear



^{18}F tiene una vida media mas larga que el ^{11}C .

^{18}F -FDG es ampliamente usado para el estudio del metabolismo de la glucosa..

OJO: como es diferente al compuesto original, se deben conocer precisamente las diferencias entre el análogo y la molécula para medir y estudiar las funciones y propiedades de la original.





Radionucleidos en Medicina Nuclear

Radiofármacos para terapia

Ciertos radiofármacos están diseñados para aplicaciones de terapia. Estos son normalmente etiquetado con un emisor β^- , y el radiofármaco está dirigido contra células anormales, comúnmente células cancerígenas.

Los depósitos del emisor β^- deposita la radiación en un pequeño radio pequeño (típicamente 0.1 a 1 mm) y mata selectivamente a las células en esta región a través del daño por radiación.

Si el radiofármaco es más fácilmente acumulado por las células cancerígenas que las células normal, se puede obtener un efecto terapéutico.