



El núcleo y sus radiaciones.

clase 4

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





¿Qué es la radioactividad?

- ❖ En la naturaleza existen muchos elementos radioactivos. Los seres vivos son radioactivos por los nucleídos inestables presentes en sus organismos, como el ^{14}C y el ^{40}K .
- ❖ El estudio de la radioactividad natural se inició en 1896. Becquerel descubrió una radiación procedente de sales de uranio, que «se parecía» a los rayos x.
- ❖ Investigaciones intensivas en las dos décadas siguientes, a cargo de Marie y Pierre Curie, Ernest Rutherford y muchos otros más, revelaron que las emisiones consistían en partículas con carga positiva, negativa y rayos neutros.
- ❖ Se les asignaron los nombres **alfa**, **beta** y **gamma** por sus características de penetración.



¿Qué es la radioactividad?

Desintegración radioactiva: proceso por el cual núcleo inestable se transforma en una más estable al emitir partículas, fotones o ambos, liberando energía en el proceso.

Si bien el proceso puede involucrar electrones atómicos, es un proceso nuclear causado por la inestabilidad de núcleo.

En esta clase discutiremos las características generales de varios modos de desintegración radioactiva y su importancia en medicina nuclear.



¿Qué es la radioactividad?

❖ Al núcleo que decae se le llama

núcleo precursor (núcleo padre),

y al núcleo producido se le llama

núcleo derivado (núcleo hijo).

❖ Cuando un núcleo radioactivo decae el núcleo hijo también puede ser inestable.

Serie de decaimientos sucesivos hacia una configuración estable. («**cadena radiactiva**»).

❖ **radioactividad** = emisión de partículas y radiaciones

❖ **desintegración radioactiva** = proceso de emisión



¿Qué es la radioactividad?

- ❖ El decaimiento radioactivo es espontáneo, en el sentido que el momento exacto en que un dado núcleo decae no puede ser predicho.

Proceso de naturaleza estadística.

- ❖ El proceso de decaimiento no es afectado por ninguna variable externa (calor, temperatura, presión, o que otros núcleos hayan decaído o no).



¿Qué es la radioactividad?

La desintegración radioactiva no solo da como resultado la transformación de una especie nuclear a otra, sino también la transformación de masa en energía.

Si todos los productos de un decaimiento particular se juntaran y pesaran, se encontraría que su peso sería menor que el del átomo radioactivo original.

La mayor parte de esta energía se convierte en energía cinética de las partículas emitidas, fotones y una porción (generalmente insignificante) de energía de retroceso del núcleo.



¿Qué es la radioactividad?

Decaimiento radioactivo: involucra al núcleo

Reacción química: involucra a los electrones (estrictamente, los mas externos, los de valencia).

Que un átomo tenga un núcleo inestable no afecta su estado ni su comportamiento químico (la inversa es también válida).

Ejemplo:

^{131}I exhibe el mismo comportamiento químico que el átomo de ^{127}I (isótopo estable del I).

El ^{131}I tiene la mismas características radioactivas ya sea cuando es un ion o está incorporado en una molécula.



¿Qué es la radioactividad?

Que los procesos y propiedades radioactivas y químicos sean independientes es de gran importancia en Física Médica: un trazador radioactivo se comporta química y fisiológicamente como el isótopo estable.

- Dos excepciones: la diferencia de masas entre isótopos produce ligeras diferencias en algunos procesos (difusión, temperaturas de cambio de fase). **Efecto isotópico.**

La vida media de algunos elementos radioactivos que decaen por procesos que involucran electrones de las capas más internas puede variar muy ligeramente en función del estado químico del átomo.

(Este efecto es prácticamente indetectable, salvo en experimentos específicos, y no tiene consecuencias prácticas en Medicina Nuclear).



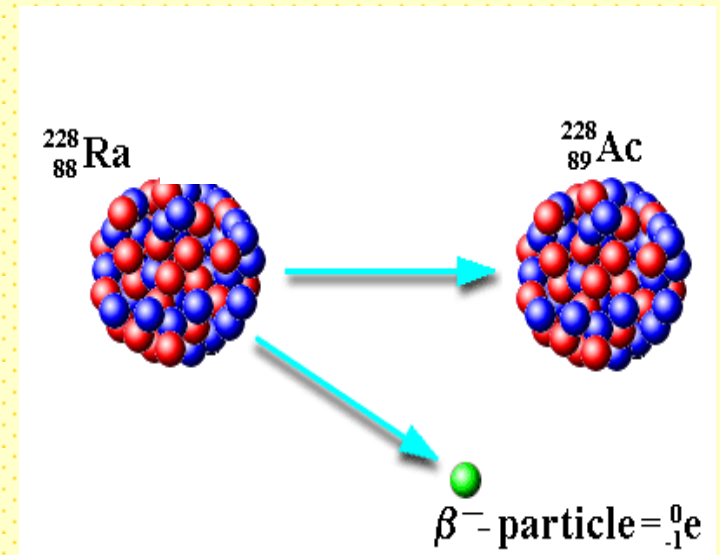
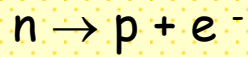
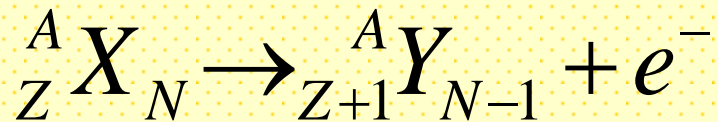
Decaimiento

Decaimiento β^- .

Proceso en el cual un neutrón del núcleo «se transforma» en un protón y un electrón, que es eyectado.



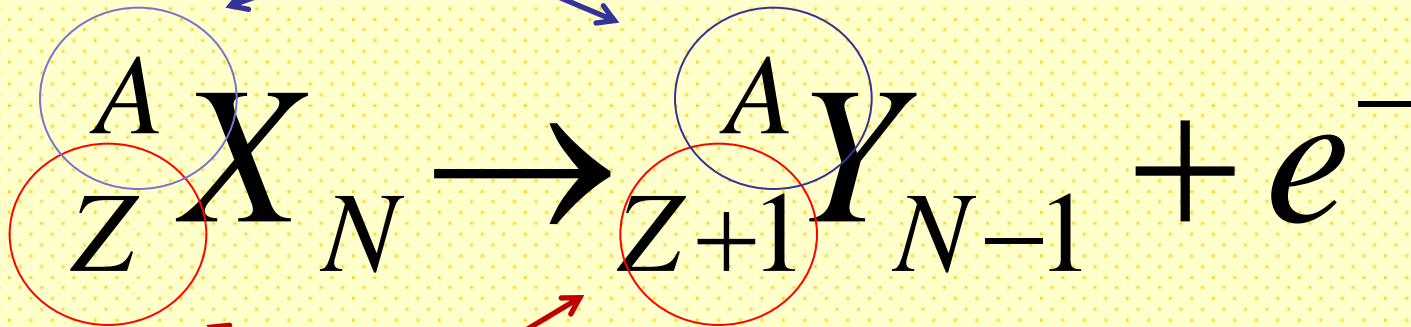
- El e^- es lo que llamamos partícula β^- .





Decaimiento

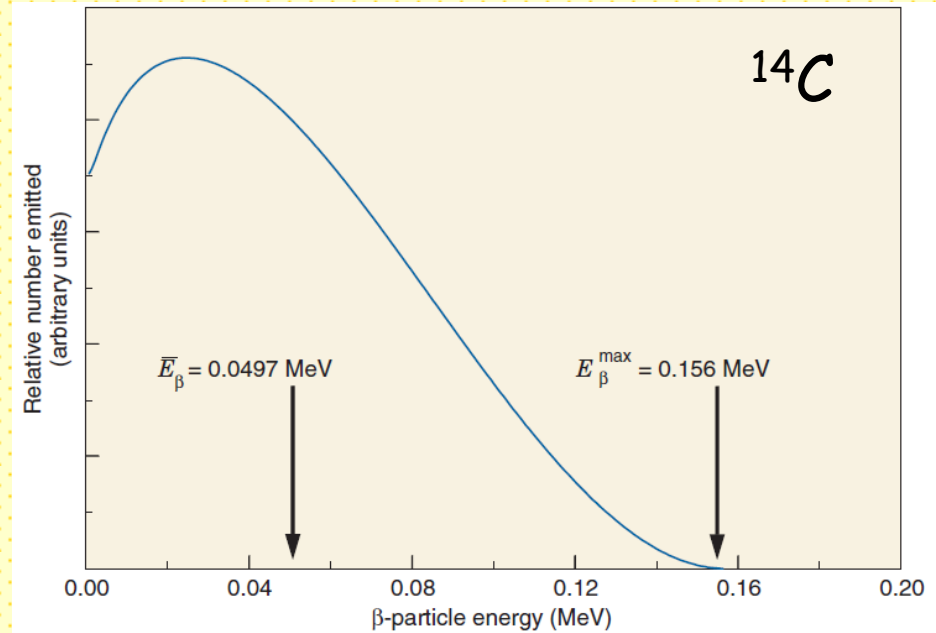
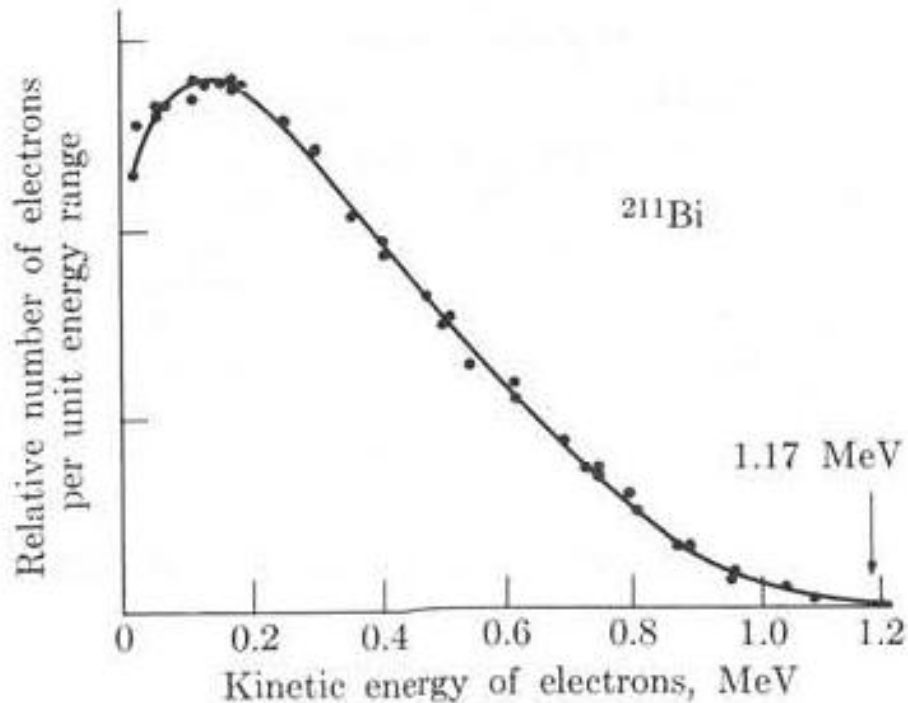
Se conserva el número
de nucleones.
Proceso isobárico



Z se incrementa en 1.
Diferentes elementos.
Trasmutación.

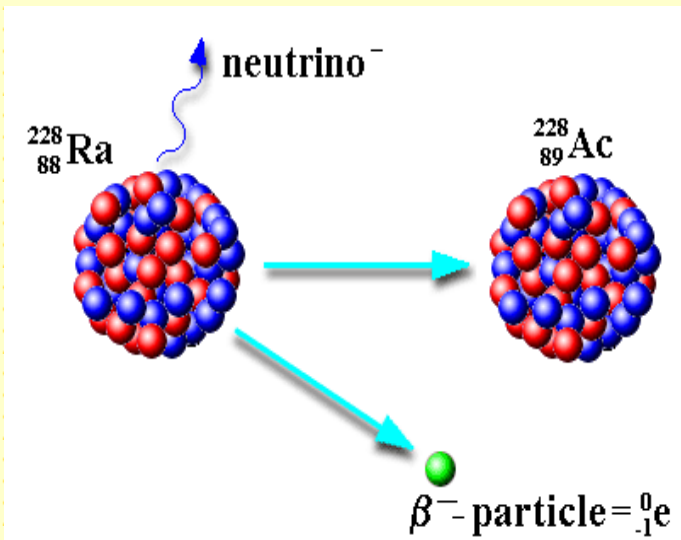
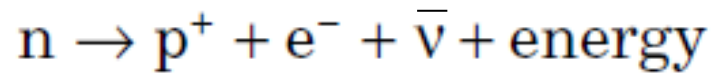
Decaimiento

Una de las características más interesantes de la desintegración β^- es que los electrones son emitidos en un rango continuo de energía.



Tercer cuerpo involucrado. Pauli sugiere (1930) la existencia del neutrino.

Decaimiento



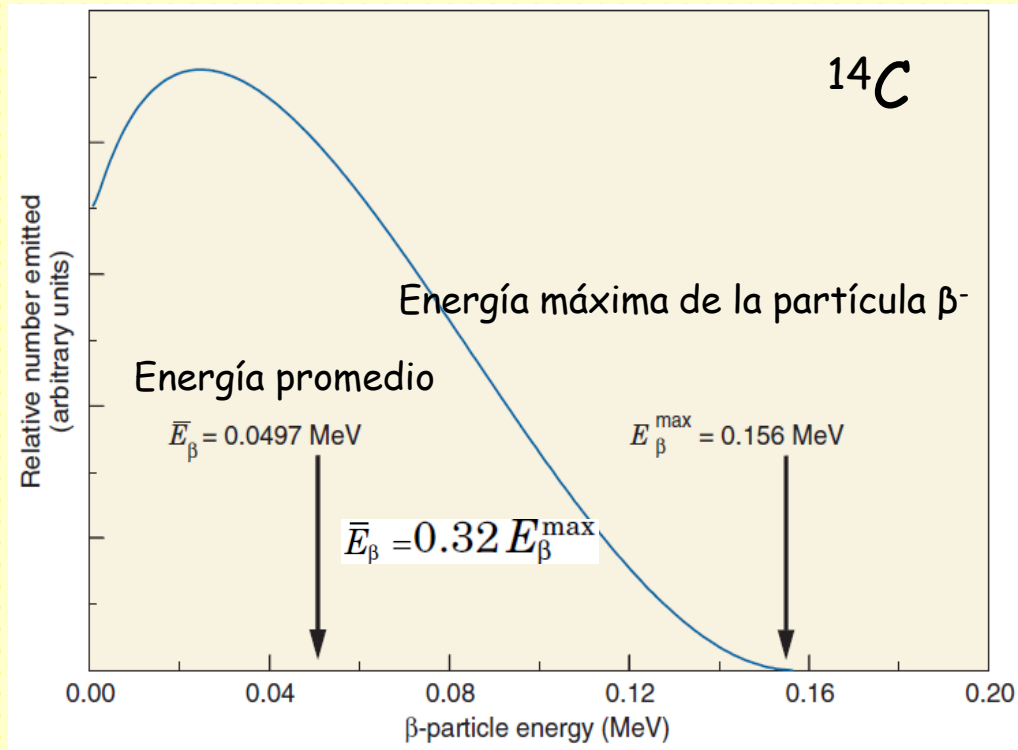
El neutrino (antineutrino) es una partícula sin carga y con masa extremadamente pequeña.

No interactúa con la materia.

Extremadamente difícil de detectar.

Decaimiento

La energía emitida en un proceso β^- se distribuye entre el electrón y el antineutrino.

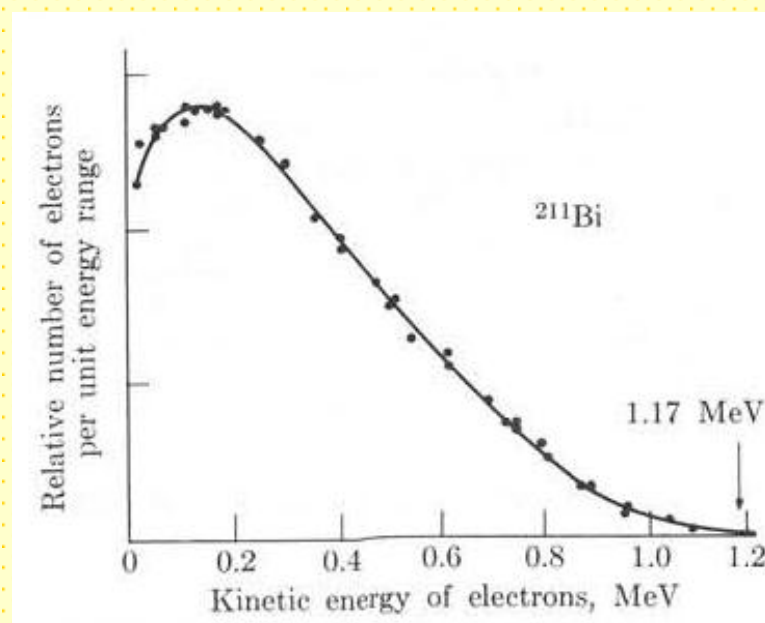
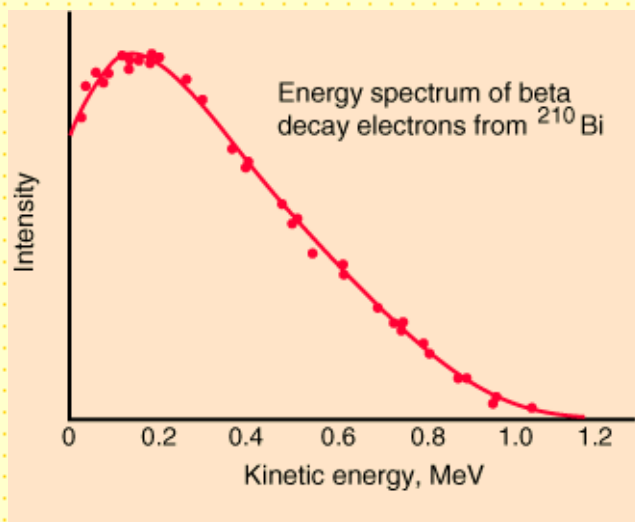
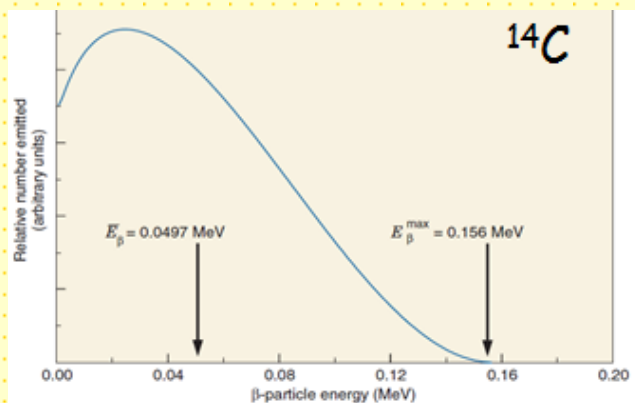


Muy raramente.
 $E_\beta = E_\beta^{\text{max}}$

$$\bar{E}_\beta \approx (1/3)E_\beta^{\text{max}}$$

La energía promedio es una característica de cada nucleído.

Decaimiento





Decaimiento

La detección de partículas β es problemática, sobre todo para aplicaciones en medicina nuclear.

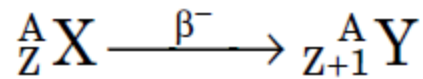
Esto se origina en que pueden atravesar espesores relativamente pequeños de materiales sólidos. Ejemplo: unos pocos milímetros de tejidos blandos.

Por lo tanto, es difícil detectar partículas β proveniente del interior del cuerpo con un detector que se encuentra fuera del cuerpo.

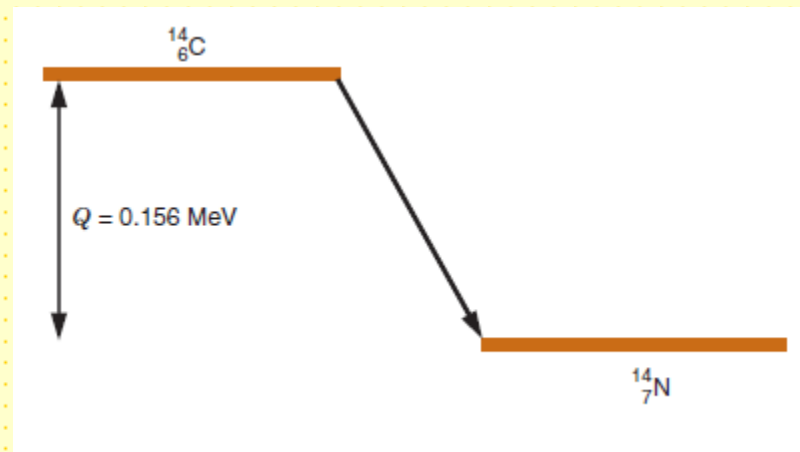
Por esto, emisores β rara vez se utilizan cuando la medición debe realizarse in situ. Algunos de los empleados en medicina nuclear son ^3H , ^{14}C , ^{32}P

Decaimiento

Los procesos de decaimiento de suelen representar por un **esquema de decaimiento**.



Decaimiento «hacia la izquierda» (hacia Z mayores)



La diferencia de alturas entre padre-hijo es proporcional a la energía liberada, la energía de transición del proceso de decaimiento (Q).
(ya veremos mas detalles y como calcular esta energía).



Decaimiento

Antes de seguir, un comentario. En el proceso β^- : $n \rightarrow p + e^-$

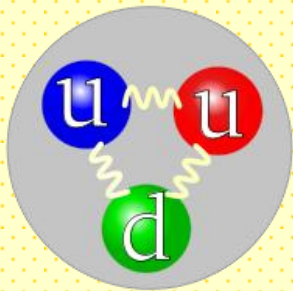
Y el e^- es eyectado del núcleo.

Todo bien. Pero En el núcleo no hay electrones.

Entonces?

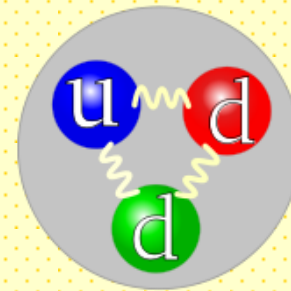


Decaimiento



Estructura de quarks de un protón.

Clasificación	Barión
Composición	2 quarks arriba, 1 quark abajo
Familia	Fermión
Grupo	Hadrón
Interacción	Gravedad, Débil, Nuclear fuerte, Electromagnética
Símbolo(s)	p, p ⁺
Antipartícula	Antiprotón
Teorizada	William Prout (1815)
Descubierta	Ernest Rutherford (1919)



Estructura de quarks de un neutrón.

Clasificación	Barión
Composición	1 quark arriba, 2 quarks abajo
Familia	Fermión
Grupo	Hadrón
Interacción	Gravedad, Débil, Nuclear fuerte
Símbolo(s)	n
Antipartícula	Antineutrón
Teorizada	Ernest Rutherford (1920)
Descubierta	James Chadwick (1932)



Decaimiento

Decaimiento β^- y desexcitación γ .

Luego del decaimiento, el núcleo hijo puede quedar en un estado que tiene un «exceso de energía».

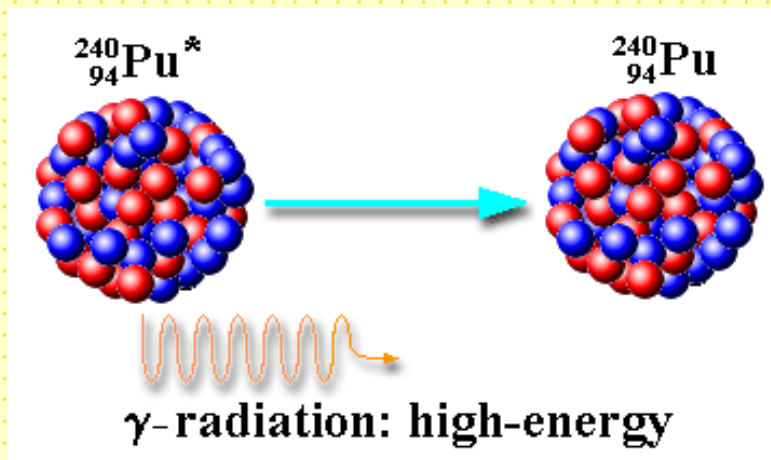
- Estados excitados
- Estados metaestables

Ambos son estados inestables. La diferencia es la vida media de estos estados.

Estados excitados: emiten la energía de exceso en un $t < 10^{-12}$ s luego de haber llegado a ese estado.

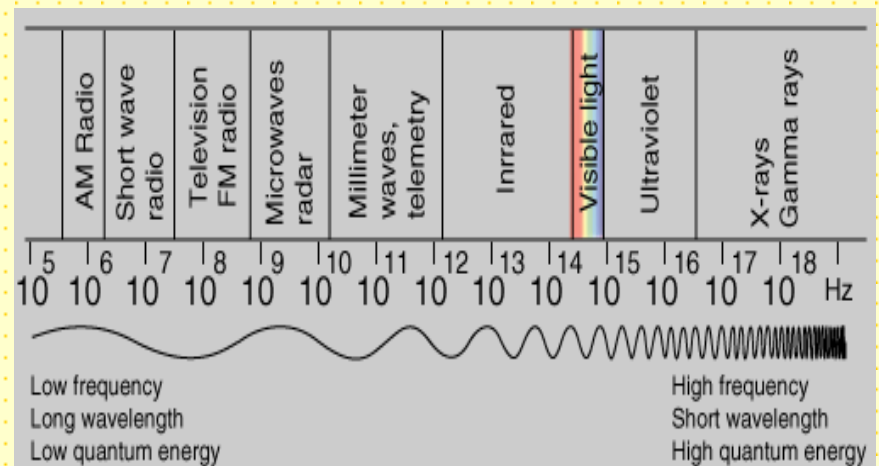
Estados metaestables: emiten la energía en un $t > 10^{-12}$ s.

Decaimiento



$$1 \text{ eV} = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{sec}^2$$

$$E(\text{keV}) = 1.24/\lambda(\text{nm})$$





Decaimiento

Algunos estados metaestables son bastante «longevos»: tiempos de vida promedio de varias horas.

Debido a esto, muchos estados metaestables son considerados como una entidad separada y se los clasifica como nucleídos.

Dos nucleídos que difieren en que uno es un estado metaestable se denominan **isómeros**.

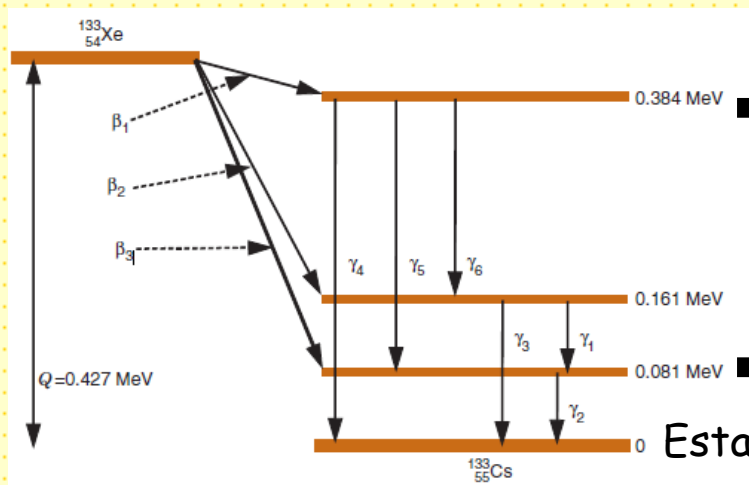


Estados excitados



Estados metaestables

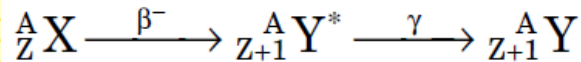
Decaimiento



Estados excitados/ metaestables

Estado fundamental

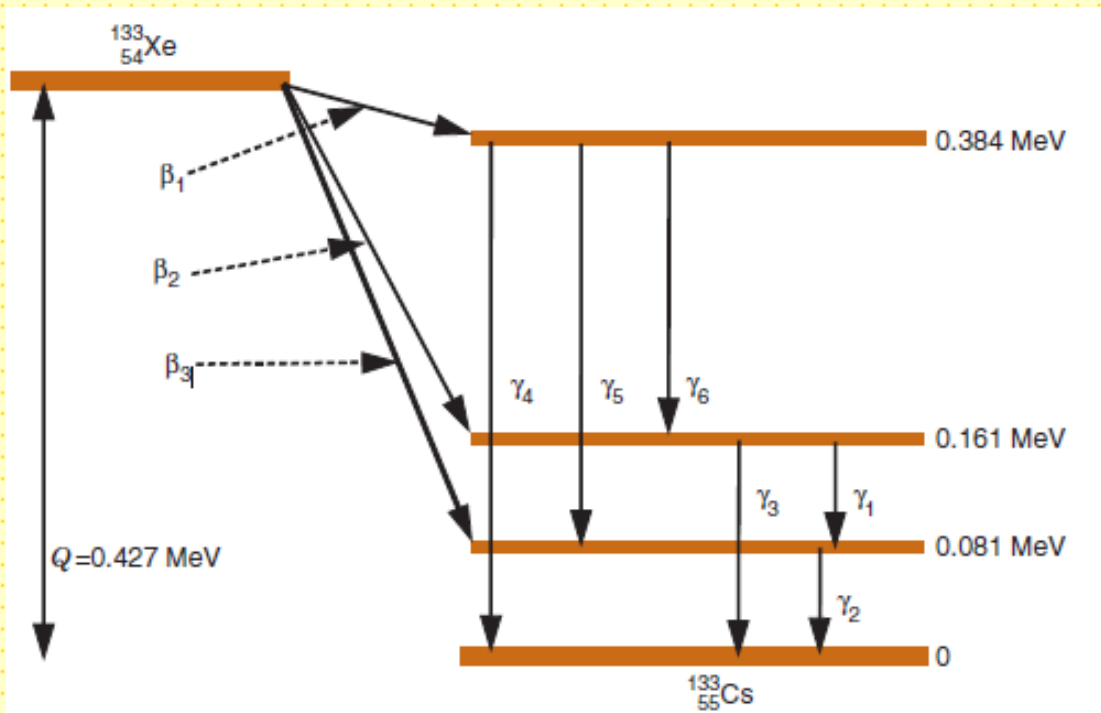
El núcleo excitado decae a un estado de menor energía emitiendo uno o varios rayos γ .



Si el decaimiento se produce desde un estado metaestable: **transición isomérica**.

Excepto por la vida media, no hay ningún tipo de diferencia en el decaimiento desde un estado excitado o un estado metaestable.

Decaimiento



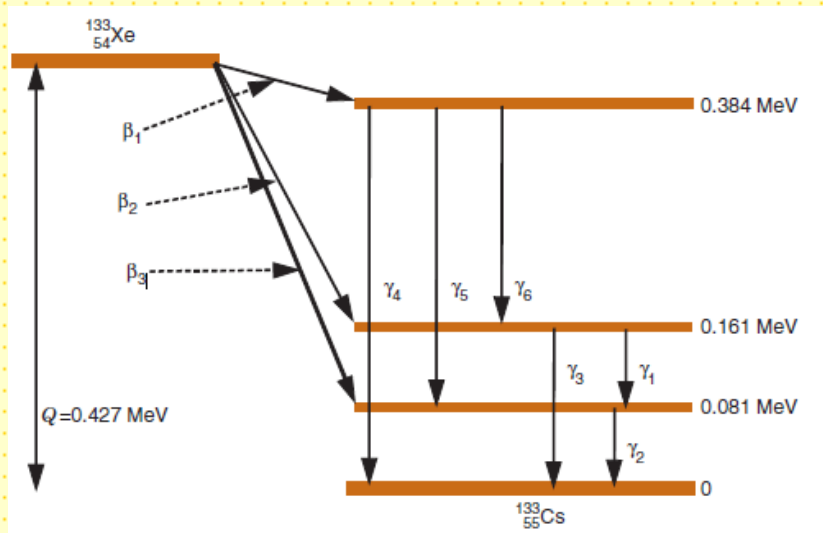
Cada decaimiento β^- tiene una probabilidad de ocurrir.

Lo mismo ocurre con la emisión de cada rayo γ .

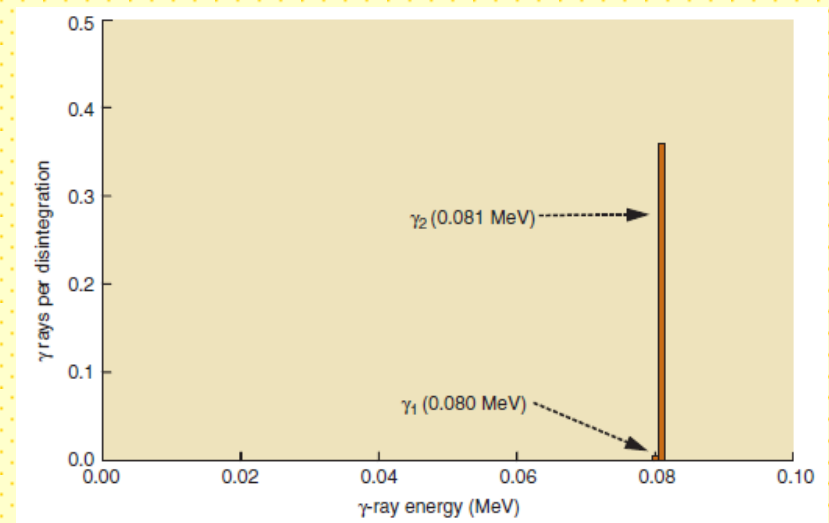
β^-_3 tiene una probabilidad de 99.3%.

Luego el ^{133}Cs decae al estado fundamental con la emisión de γ_2 . Los demás procesos β^- y γ tienen probabilidades despreciables..

Decaimiento



Rayos γ : espectro discreto.



(Ya veremos como se ve un espectro γ real).

Los rayos γ son mucho mas penetrantes que los β^- , por lo cual no presentan los problemas de detección que tienen las β^- . Por esto tienen amplia aplicación en medicina nuclear.

Algunos isótopos que decaen por β^- y γ son ^{131}I , ^{133}Xe , ^{137}Cs .



Decaimiento

Conversión interna.

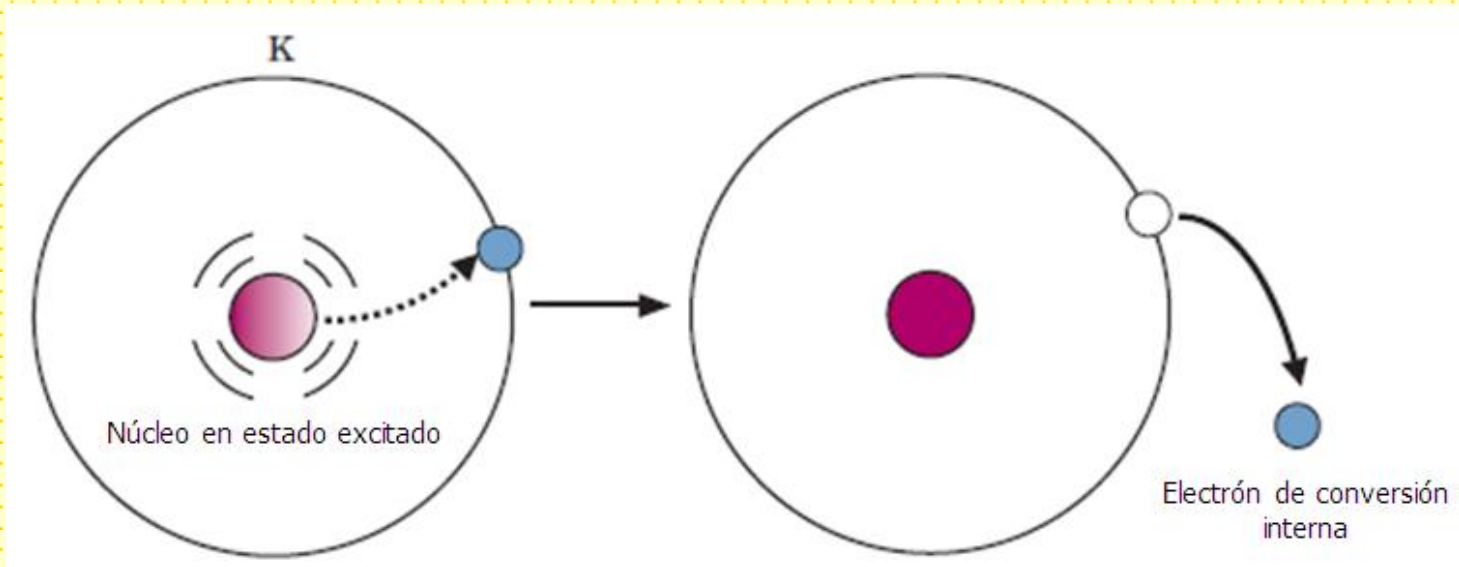
Un mecanismo por el cual un núcleo puede «desprenderse» de su exceso de energía, alternativo al la emisión γ , es conversión interna.

La probabilidad de uno u otro proceso depende de cada núcleo y estado excitado.

Conversión interna es mas probable en el caso de decaimiento desde estados metaestables.

Decaimiento

La energía de excitación es directamente transferida a un electrón de las capas más internas (K o L), que es eyectado del átomo.



$$E_{\text{cin}} = E_{\text{exc}} - E_{\text{ligadura}}$$

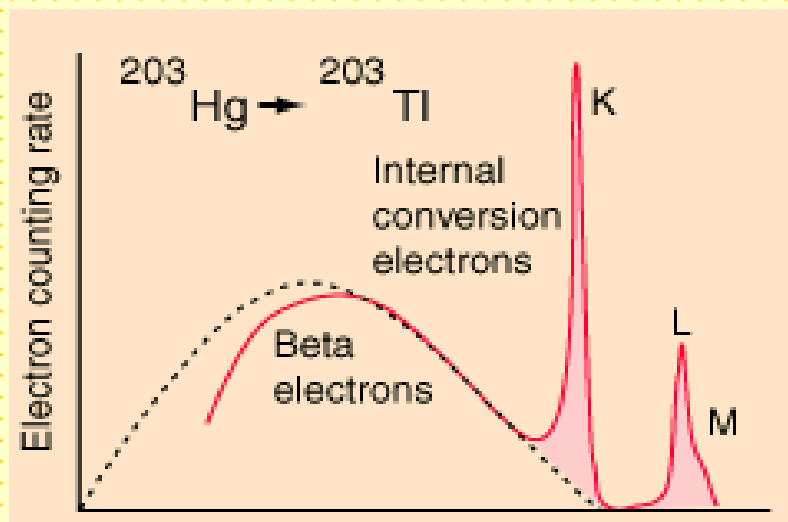
$$E_{\text{cin}} = E_{\gamma} - E_{\text{ligadura}}$$

Decaimiento

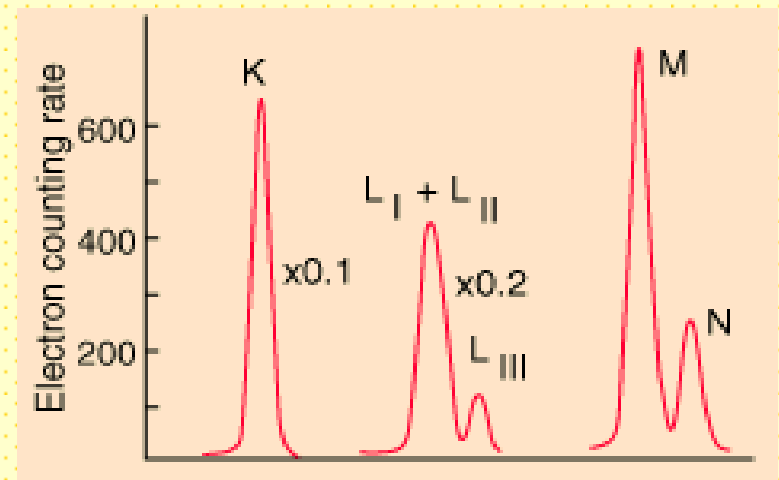
$^{203}\text{Hg} \rightarrow ^{203}\text{Tl}$ por β , dejando en un estado excitado al ^{203}Tl . Decaimiento al estado fundamental, γ de 279,190 keV o C.E.

$$E_{\text{cin}} = E_{\gamma} - E_{\text{ligadura}}$$

A mayor resolución se puede resolver la conversión interna de electrones de las capas L, M y N. Z.

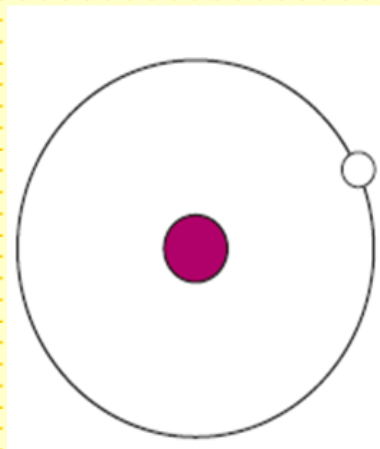


Espectro de electrones de conversión interna superpuesto sobre el espectro continuo de electrones β .

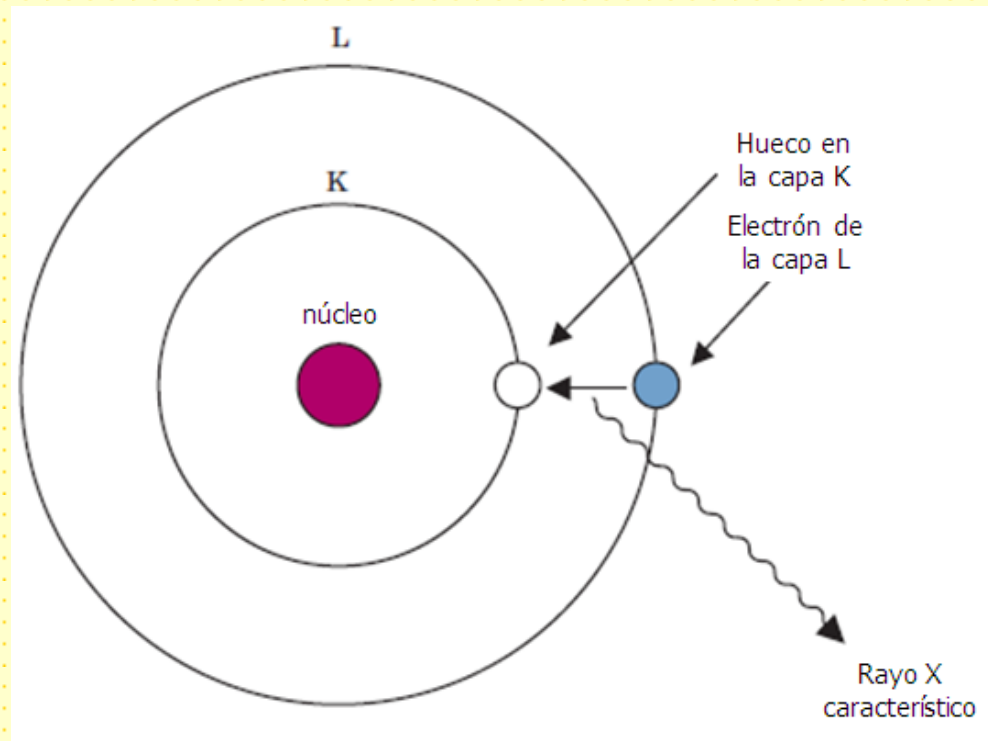


A una resolución aún mayor, se pueden resolver las tres capas L.

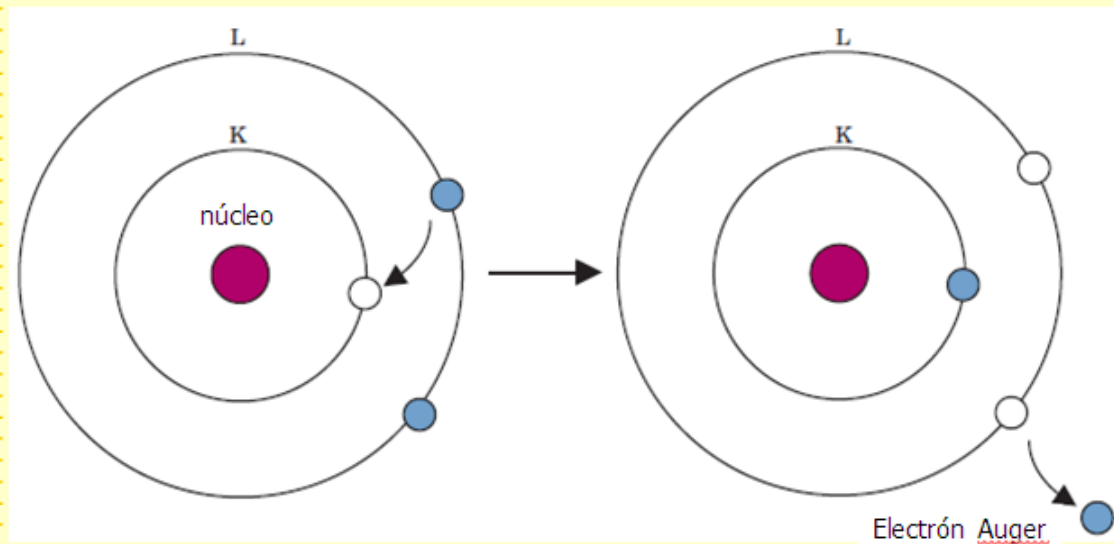
Decaimiento



El hueco es llenado por un electrón de una capa mas externa.
El proceso continúa con la emisión de rayos X o electrones Auger
(mecanismo alternativo a Rayos X, cada uno con una dada probabilidad).



Decaimiento



La energía del electrón de la capa L que «cae» a la capa K es transferida a otro electrón de la capa L.

$$E_{\text{cin}}^{\text{Auger}} = E_{\text{ligadura K}} - 2E_{\text{ligadura L}}$$

Luego del proceso Auger, quedan dos huecos, que son llenados y se vuelven a emitir rayos X o electrones Auger.

Los procesos β^- y Auger dan lugar a la emisión de electrones.
Dos diferencias:

Los β^- tienen origen nuclear.
Los electrones Auger tienen origen atómico.

β^- : espectro de energía continuo.
Electrones Auger: espectro discreto.



Decaimiento

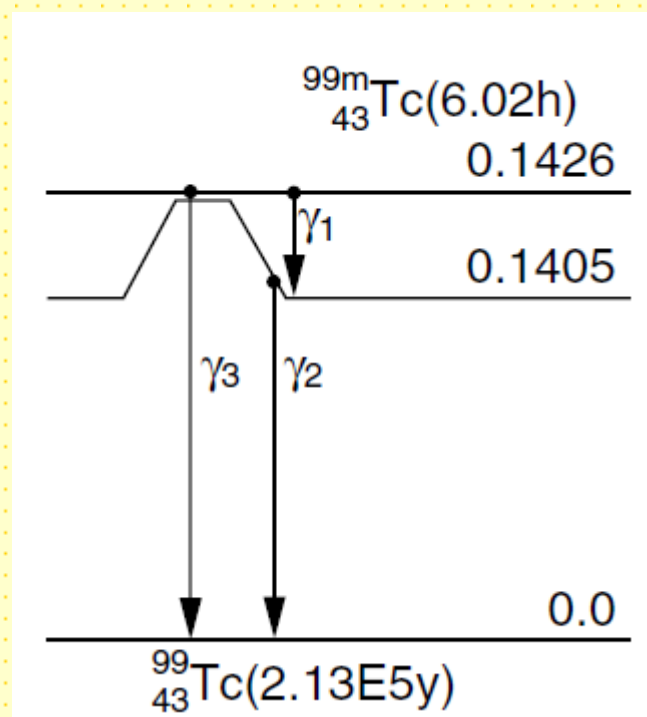
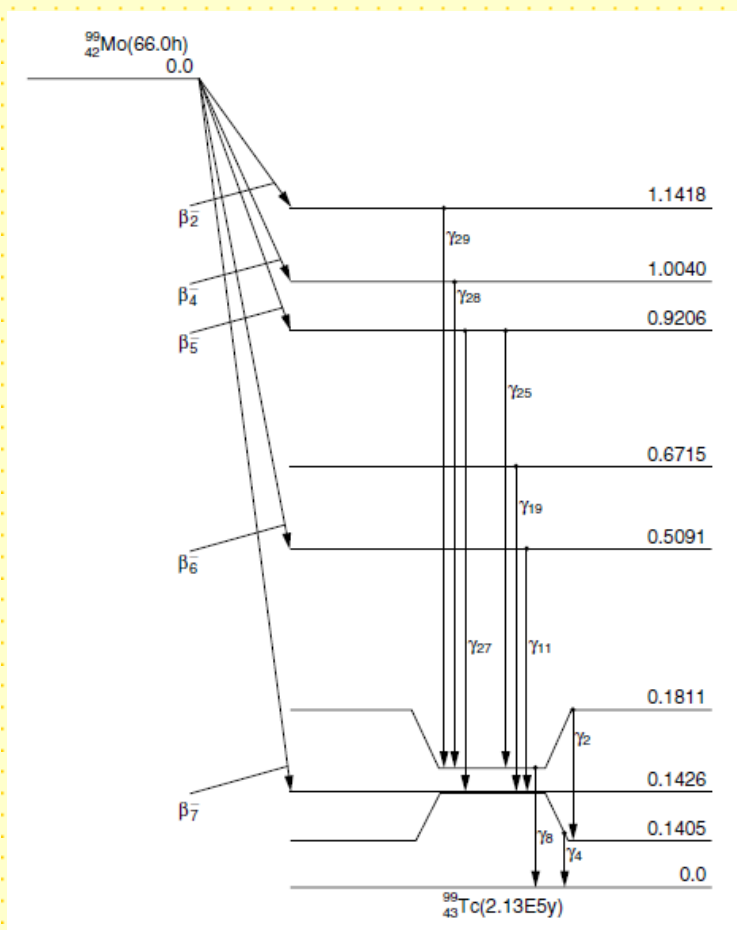
Radionucleidos que presentan estados metaestables son muy importantes en medicina nuclear.

La vida media relativamente larga de estos estados permiten separarlos de su padre radioactivo y así obtener una fuente de rayos γ pura.

Si bien siempre hay emisión de electrones de conversión, estos son absorbidos por el propio tejido, produciendo una dosis de irradiación al paciente (en general, la probabilidad de conversión interna es baja frente a emisión γ y para los radionucleidos comúnmente empleados).

El estado metaestable (o radionucleido) mas empleado es el ^{99m}Tc .

Decaimiento





Decaimiento

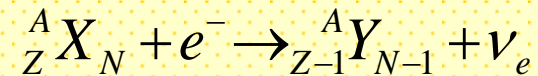
Captura electrónica (C.E.).

Muchas veces llamado «decaimiento β^- inverso».

β^- : $n \rightarrow p + e^- + \text{neutrino}$

C.E.: $p + e^- \rightarrow n + \text{neutrino}$

El núcleo absorbe un electrón de las órbitas más internas (generalmente de la capa K).



- Trasmutación del elemento.
- Proceso isobárico.

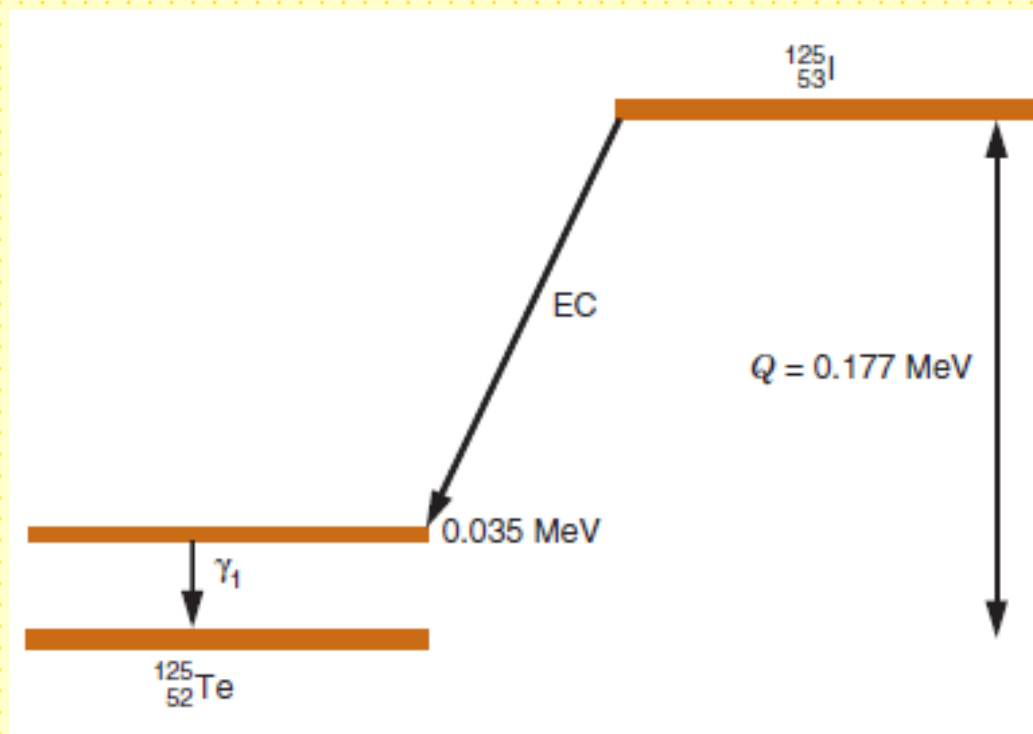
Decaimiento

Los rayos X emitidos luego del decaimiento vía E.C. pueden ser detectados fuera del cuerpo si tienen una energía tal que les permita atravesar el tejido sin ser absorbidos.

Esta energía debe ser de al menos unos 25 keV (órganos como la tiroides).

Esta condición se da para átomos pesados.

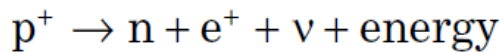
«hacia la izquierda, $Z \rightarrow (Z-1)$ »



Decaimiento

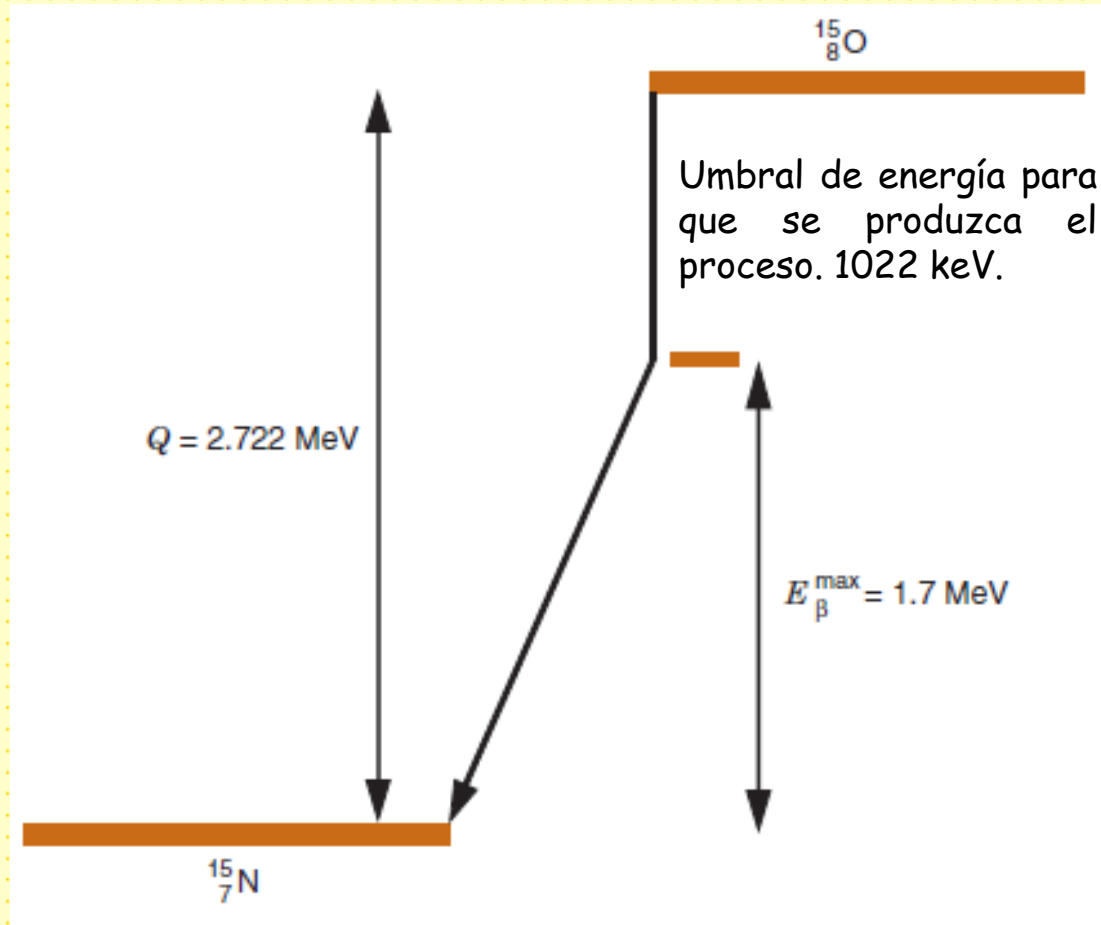
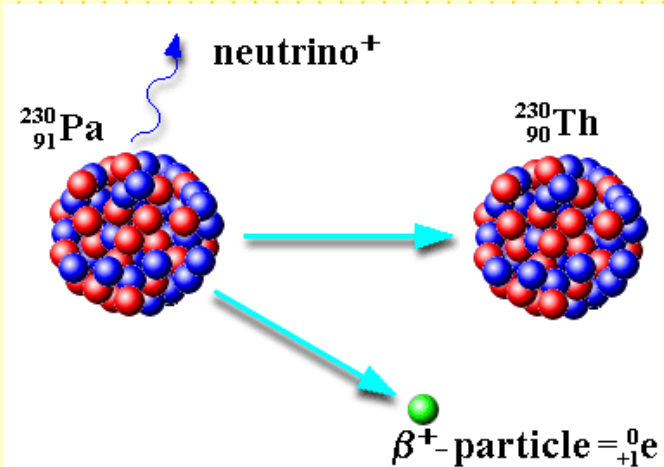


Decaimiento β^+ .



Positrón: antipartícula del electrón.

- Trasmutación del elemento.
- Proceso isobárico.
- Hacia la izquierda, $Z \rightarrow (Z-1)$





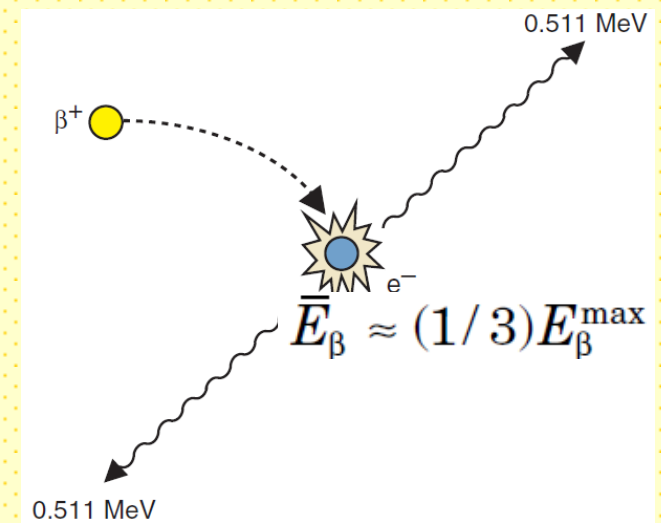
Decaimiento

Después de ser emitido, el positrón pierde su energía y alcanza el reposo (termalización) luego de recorrer unos pocos mm.:

Se une con un electrón formando un átomo llamado positronio, que tiene una vida media de 10^{-10} s.

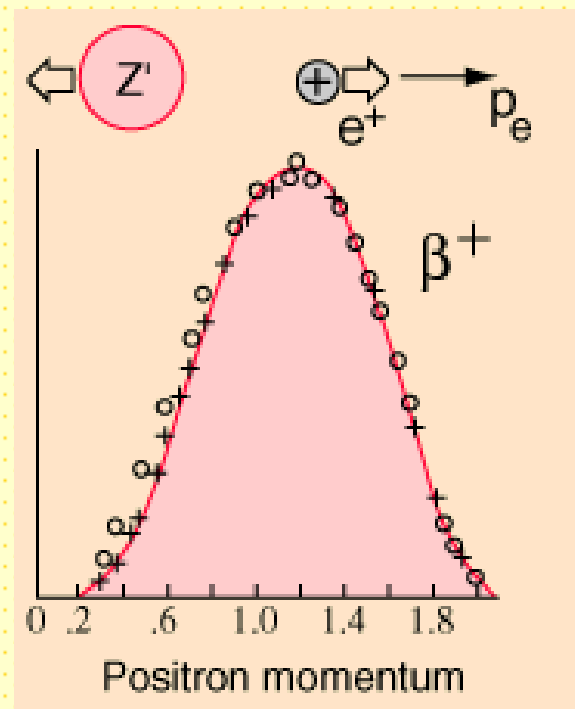
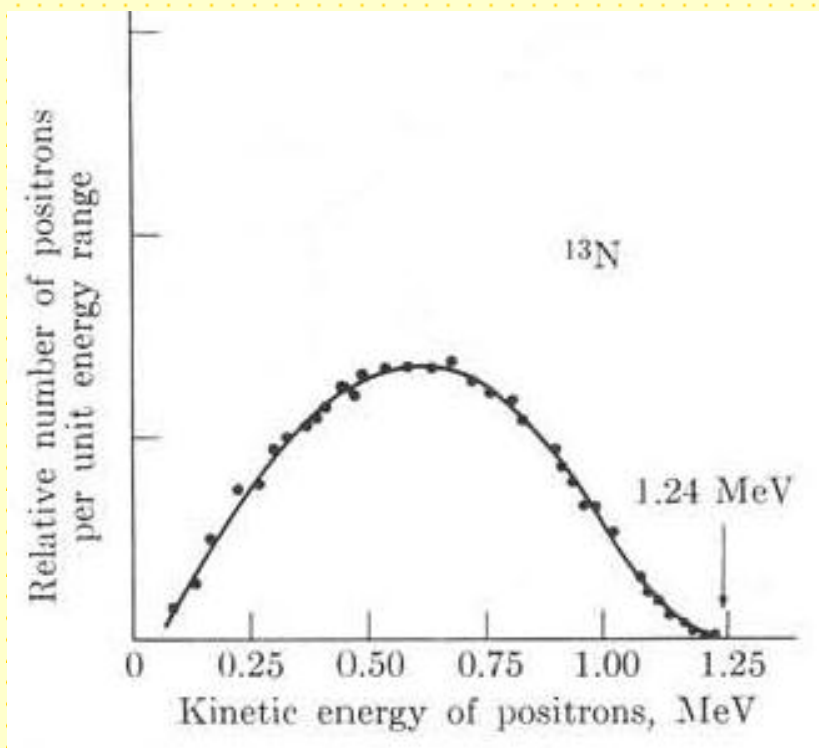
Luego se aniquila con el electrón emitiendo dos rayos γ de 511 keV en direcciones opuestas (conservación de **P**).

(en realidad, como ambas partículas tienen velocidad, el ángulo es ligeramente diferente a 180°).



Los radionucleidos emisores de positrones son muy útiles en imágenes médicas: se generan dos rayos γ direccionales, lo que permite localizar el punto donde se produjo la aniquilación (tomógrafo PET).

Decaimiento





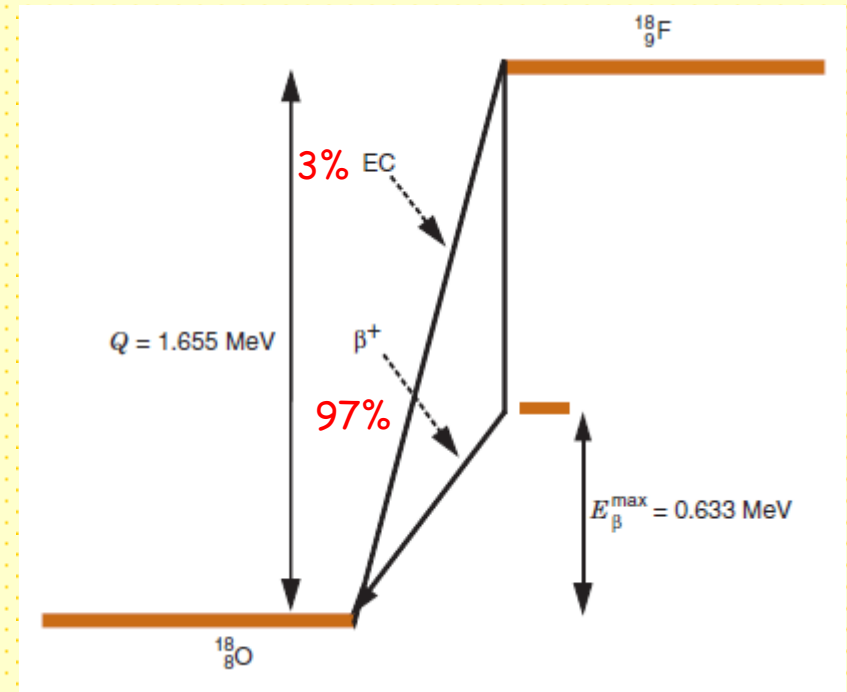
Decaimiento

El proceso β^+ es competitivo con C.E.

C.E. mas probable para átomos pesados (los electrones internos están mas cerca del núcleo).

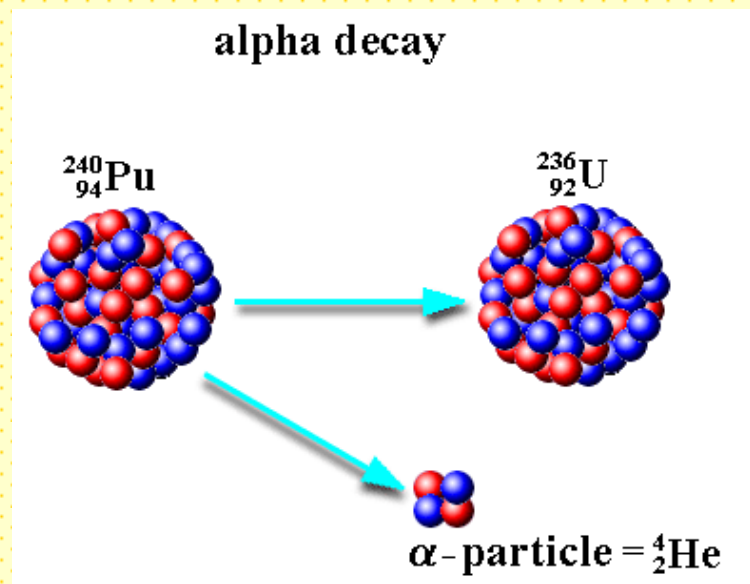
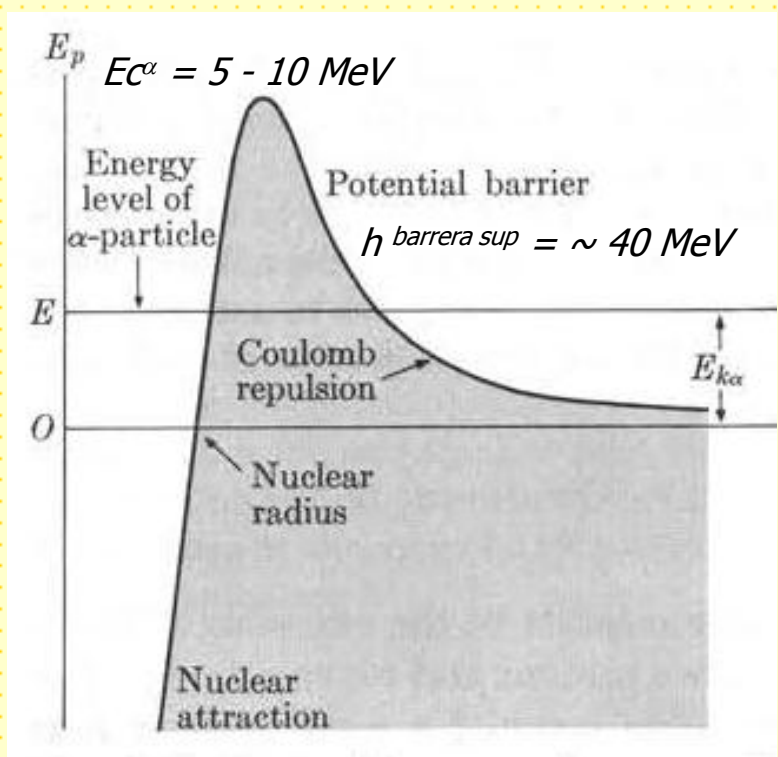
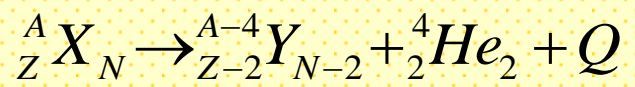
β^+ mas probable para átomos livianos.

Algunos elementos decaen por ambos procesos.



Decaimiento

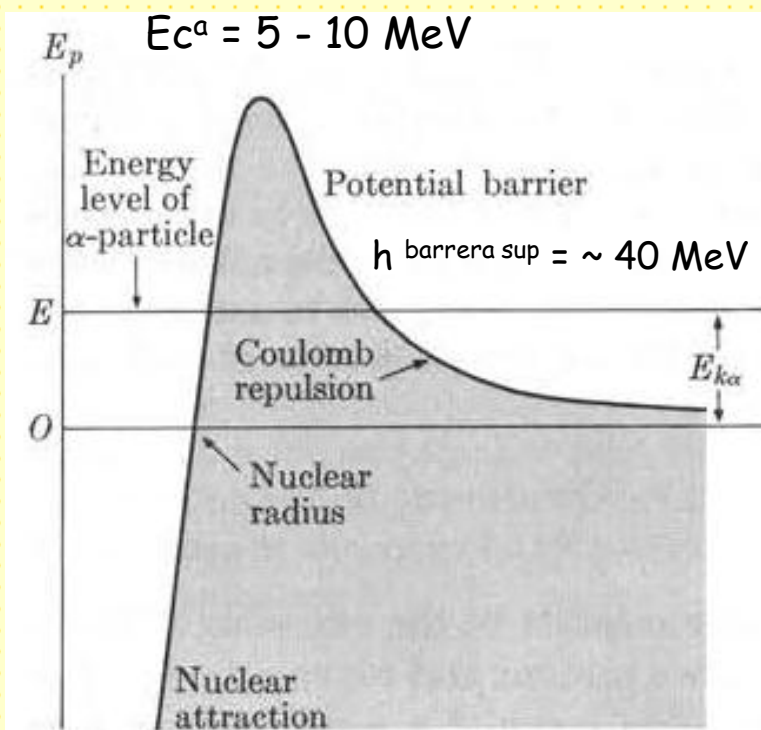
Decaimiento α



Podemos calcular la probabilidad de desintegración por unidad de tiempo λ en función de la probabilidad P de penetrar la barrera.

Decaimiento

La probabilidad depende de la altura de la barrera y de $E_{c\alpha}$

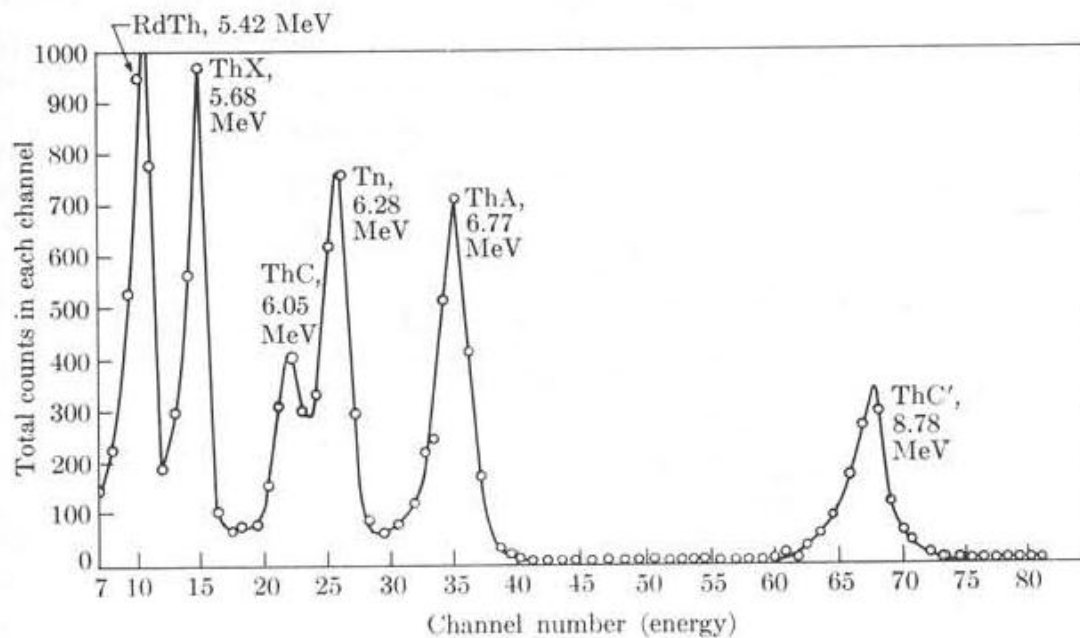
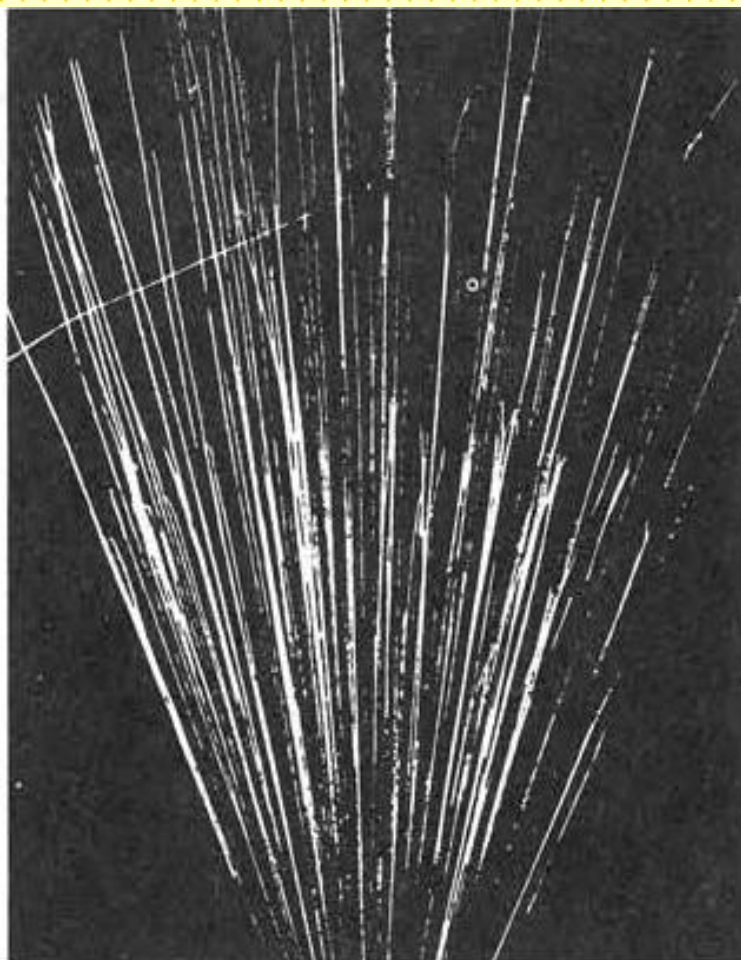


Radioactive species	Nuclide	Type of disintegration	Half-life	Disintegration constant, s^{-1}	Particle energy, MeV
Uranium I (UI)	${}_{92}^{238}\text{U}$	α	$4.51 \times 10^9 \text{ y}$	4.88×10^{-18}	4.19
Uranium X ₁ (UX ₁)	${}_{90}^{234}\text{Th}$	β	24.1 d	3.33×10^{-7}	0.19
Uranium X ₂ (UX ₂)	${}_{91}^{234}\text{Pa}$	β	1.18 m	9.77×10^{-3}	2.31
Uranium Z (UZ)	${}_{91}^{234}\text{Pa}$	β	6.66 h	2.88×10^{-5}	0.5
Uranium II (UII)	${}_{92}^{234}\text{U}$	α	$2.48 \times 10^5 \text{ y}$	8.80×10^{-14}	4.768
Thorium (Th)	${}_{90}^{230}\text{Th}$	α	$8.0 \times 10^4 \text{ y}$	2.75×10^{-13}	4.68
Radium (Ra)	${}_{88}^{226}\text{Ra}$	α	1620 y	1.36×10^{-11}	4.777
Radon (Rn)	${}_{86}^{222}\text{Rn}$	α	3.82 d	2.10×10^{-6}	5.486
Radium A (RaA)	${}_{84}^{218}\text{Po}$	α, β	3.05 m	3.78×10^{-3}	$\alpha: 5.998$ $\beta: ?$
Radium B (RaB)	${}_{82}^{214}\text{Pb}$	β	26.8 m	4.31×10^{-4}	0.7
Astatine-218 (${}^{218}\text{At}$)	${}_{85}^{218}\text{At}$	α	1.3 s	0.4	6.70
Radium C (RaC)	${}_{83}^{214}\text{Bi}$	α, β	19.7 m	5.86×10^{-4}	$\alpha: 5.51$ $\beta: 3.17$
Radium C' (RaC')	${}_{84}^{214}\text{Po}$	α	$1.64 \times 10^{-4} \text{ s}$	4.23×10^3	7.683
Radium C'' (RaC'')	${}_{81}^{210}\text{Tl}$	β	1.32 m	8.75×10^{-4}	1.06
Radium D (RaD)	${}_{82}^{210}\text{Pb}$	β	21 y	1.13×10^{-9}	0.0185
Radium E (RaE)	${}_{83}^{210}\text{Bi}$	β	5.0 d	1.60×10^{-6}	1.155
Radium F (RaF)	${}_{84}^{210}\text{Po}$	α	138.4 d	5.80×10^{-8}	5.300
Thallium-206 (${}^{206}\text{Tl}$)	${}_{81}^{206}\text{Tl}$	β	4.2 m	2.75×10^{-3}	1.51
Radium G (RaG)	${}_{82}^{206}\text{Pb}$	Stable			

Decaimiento

Fotografía de trazas. Rango bien definido.

Energía bien definida

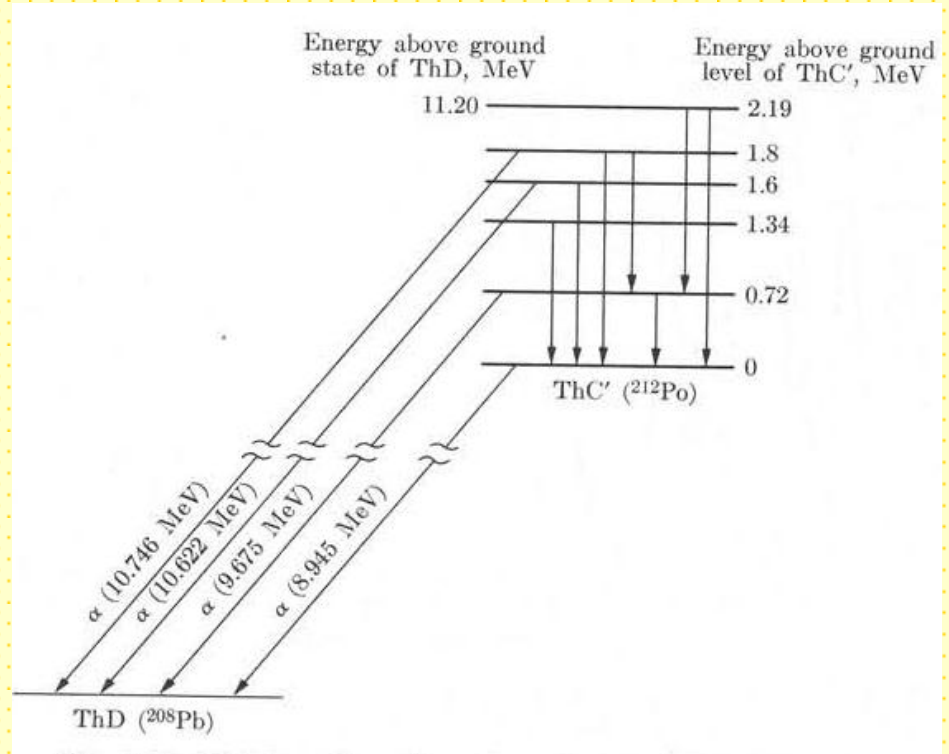
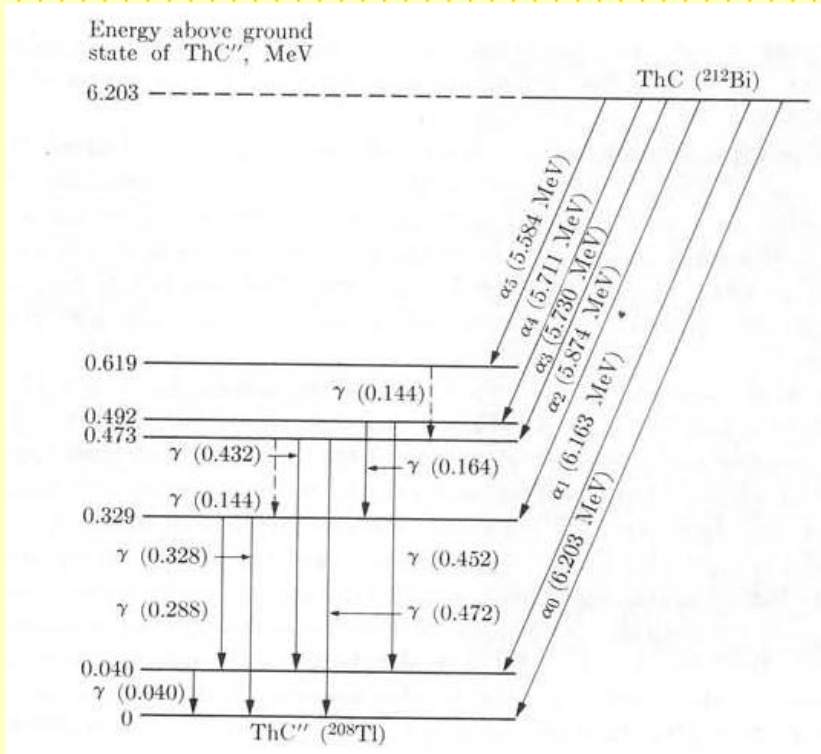


Decaimiento

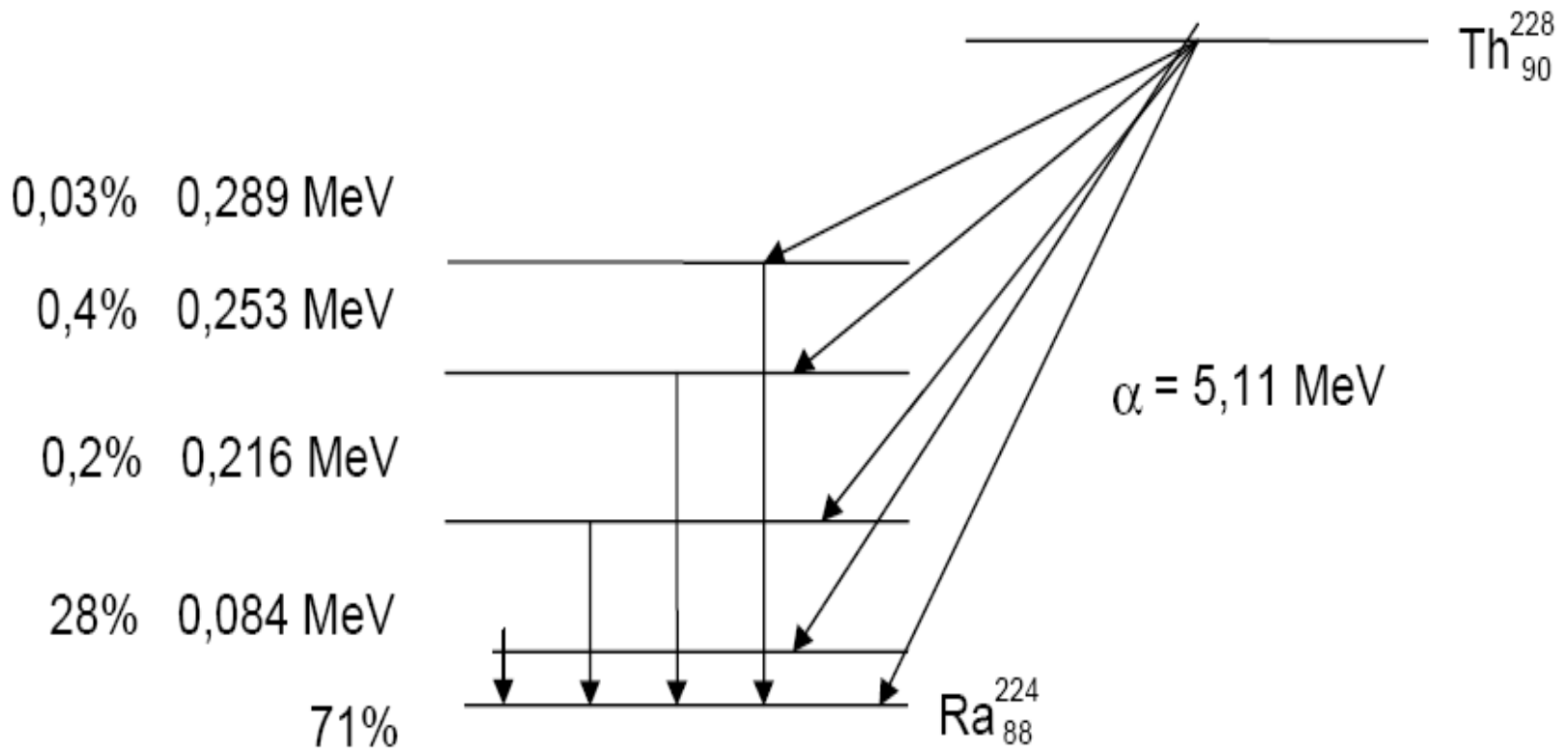
Muchos núcleos pesados se desintegran emitiendo partículas α .

$t_{1/2}$ largos.

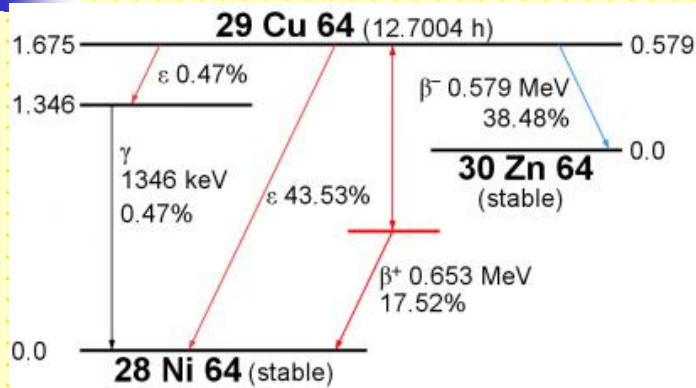
Poco interés en física médica (muy poca penetración en la materia).



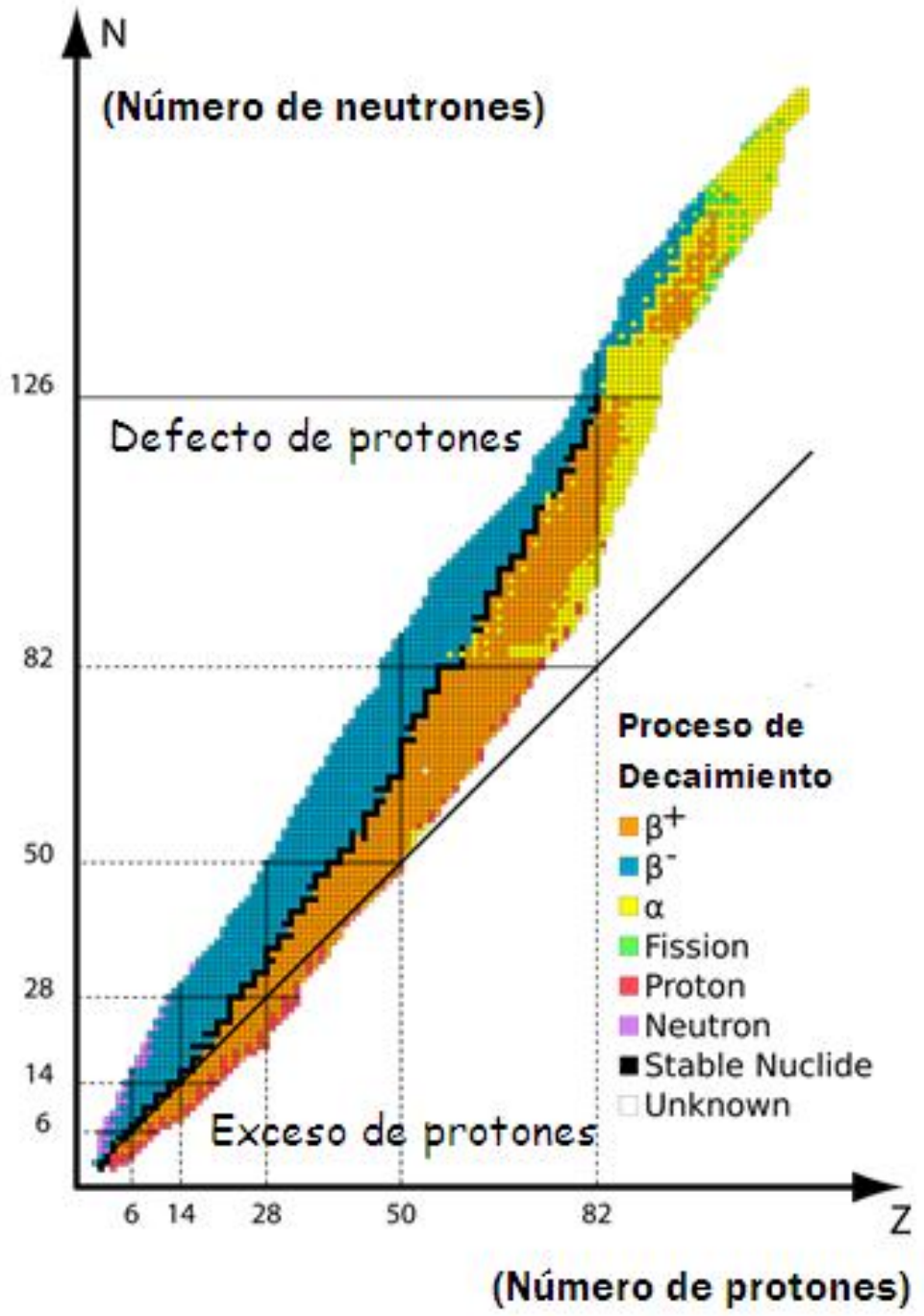
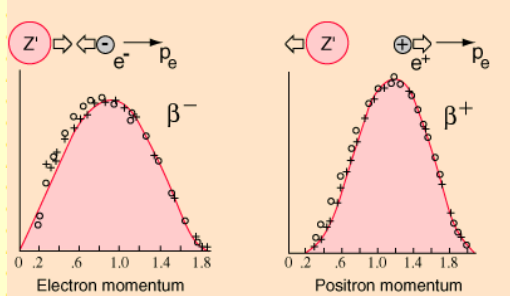
Decaimiento



Decaimiento



Zn 64 48.268 σ 0.74 $\sigma_{n,\alpha}$ 1.1E-5 $\sigma_{n,p}$ < 1.2E-5	Zn 65 244.3 d ϵ, β^+ 0.3 γ 1115... σ 66, $\sigma_{n,\alpha}$ 2.0	Zn 66 27.975 σ 0.9 $\sigma_{n,\alpha}$ < 2E-5
Cu 63 69.15 σ 4.5	Cu 64 12.7004 h ϵ, β^- 0.6, β^+ 0.7 γ (1346) σ -270	Cu 65 30.85 σ 2.17
Ni 62 3.6345 σ 15	Ni 63 100 a β^- 0.07 no γ σ 20	Ni 64 0.9256 σ 1.6





Energética

Para determinar si un dado proceso de decaimiento es posible para un dado radionucleido definimos:

$$Q = (m_X - m_Y - m_\alpha)c^2,$$

$$Q = 931.48(m_X - m_Y - m_\alpha). \quad \text{En UMA y MeV.}$$

Para que ocurra el proceso de desintegración, $Q > 0$.



Energética



$$Q_{\beta^-} = [m_Z - (m_{Z+1} + m_e)]c^2 = (m_Z - m_{Z+1} - m_e)c^2.$$

En función de masas atómicas

$$Q_{\beta^-} = (M_Z - M_{Z+1})c^2.$$

$$Q_{\beta^+} = (m_Z - m_{Z-1} - m_e)c^2$$

En función de masas atómicas

$$Q_{\beta^+} = (M_Z - M_{Z-1} - 2m_e)c^2.$$

$$Q_{\text{EC}} = (M_Z - M_{Z-1})c^2.$$



Energética

Para desintegración α :

$$E_{k\alpha} = \frac{m_Y}{m_\alpha + m_Y} Q, \quad E_{kY} = \frac{m_\alpha}{m_\alpha + m_Y} Q.$$



Cadenas radioactivas naturales

En la naturaleza se encuentran *4 cadenas naturales de desintegración*

$A = 4n$	^{232}Th	$1,39 \times 10^{10} \text{ a}$	^{208}Pb
$A = 4n + 1$	^{237}Np	$2,25 \times 10^6 \text{ a}$	^{209}Bi
$A = 4n + 2$	^{238}U	$4,51 \times 10^9 \text{ a}$	^{206}Pb
$A = 4n + 3$	^{235}U	$7,07 \times 10^8 \text{ a}$	^{207}Pb

Edad de la Tierra aprox. $4,5 \times 10^9$ años

El nucleido radioactivo más abundante en la Tierra es el isótopo del uranio ^{238}U , que sufre una serie de 14 desintegraciones, incluyendo ocho emisiones α y seis emisiones β^- , y termina en el isótopo estable del plomo, ^{206}Pb .

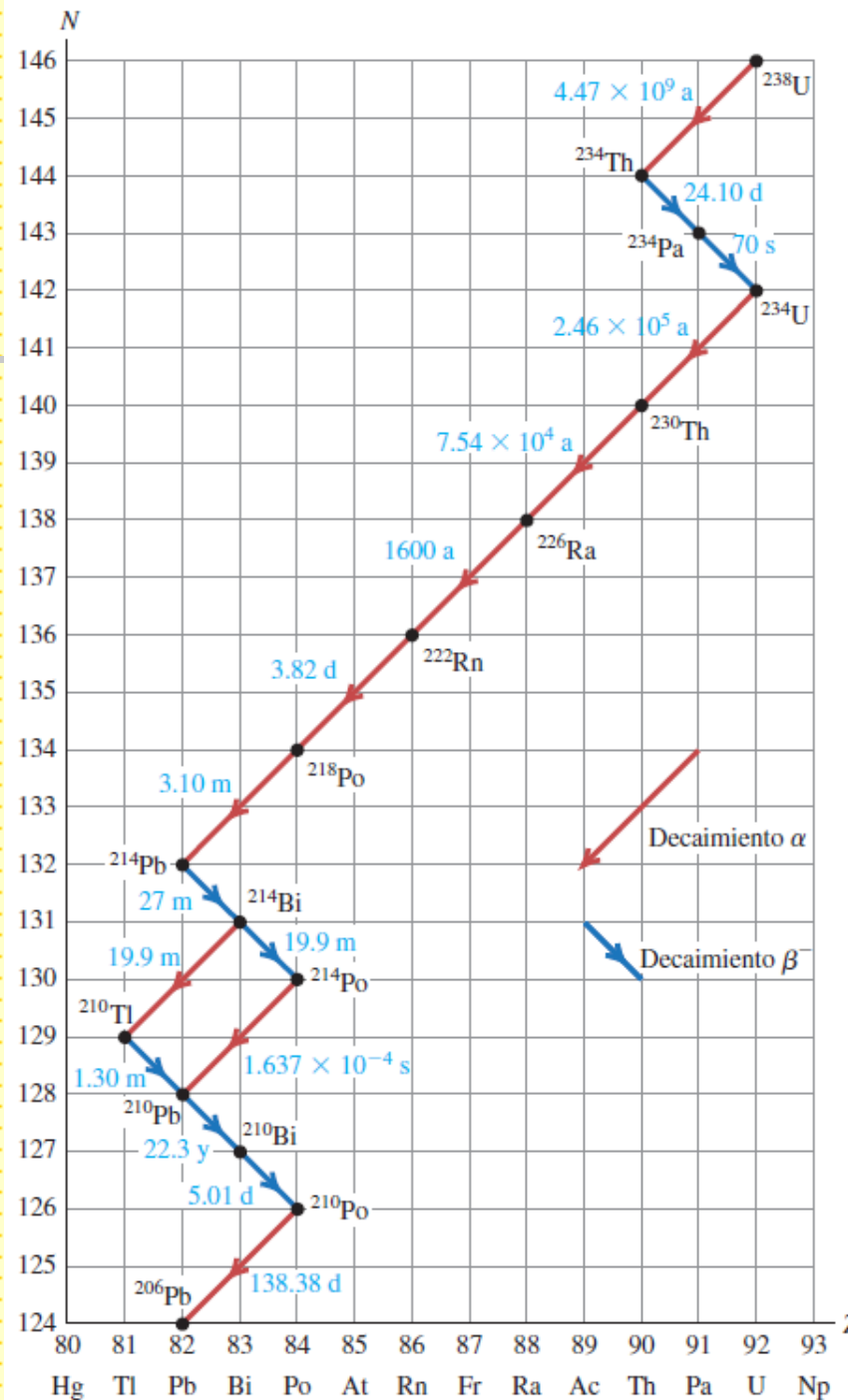
Una serie de desintegraciones radiactivas se puede representar en una gráfica de Segré. N se grafica verticalmente y Z horizontalmente. En una emisión alfa, tanto N como Z disminuyen en dos. En una emisión beta, N disminuye en uno y Z aumenta en uno.

Cadenas radioactivas naturales

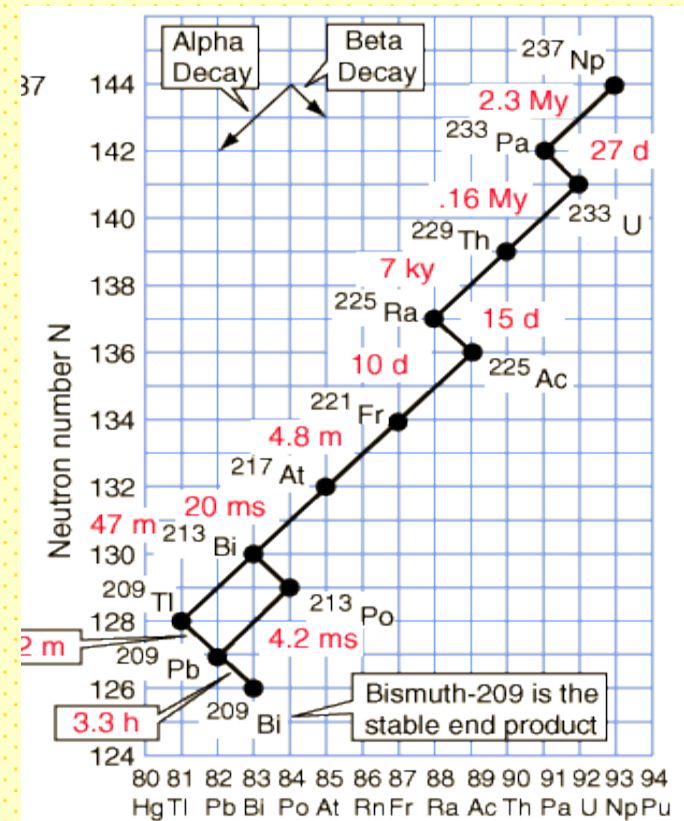
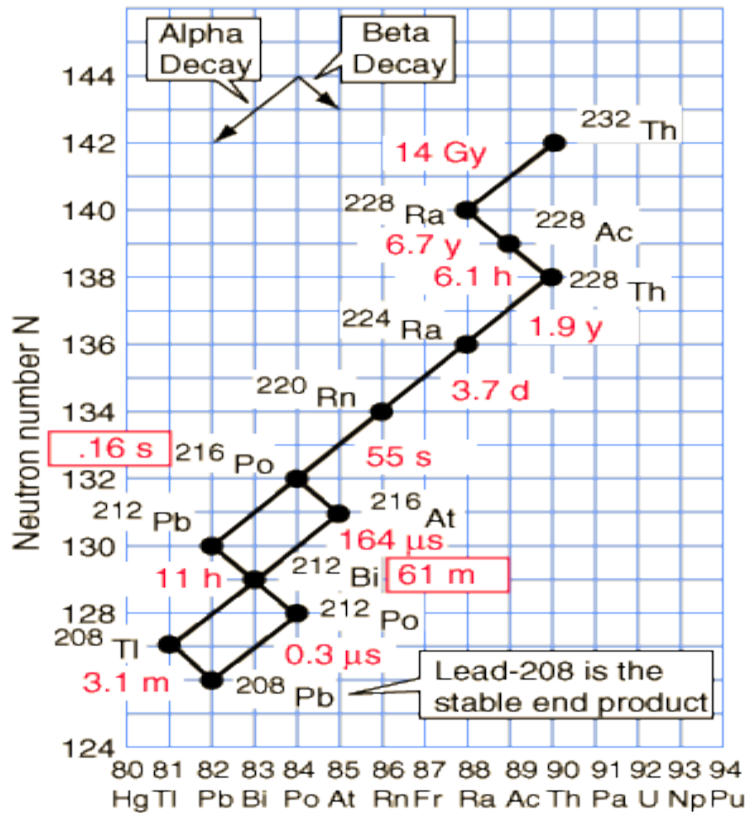
La serie de decaimiento del ^{238}U presenta una ramificación en el ^{214}Bi . Este nucleído decae a ^{210}Pb por dos caminos, α o β^- , lo cual puede suceder en cualquier orden.

Otra cadena empieza con el isótopo ^{235}U y termina en ^{207}Pb .

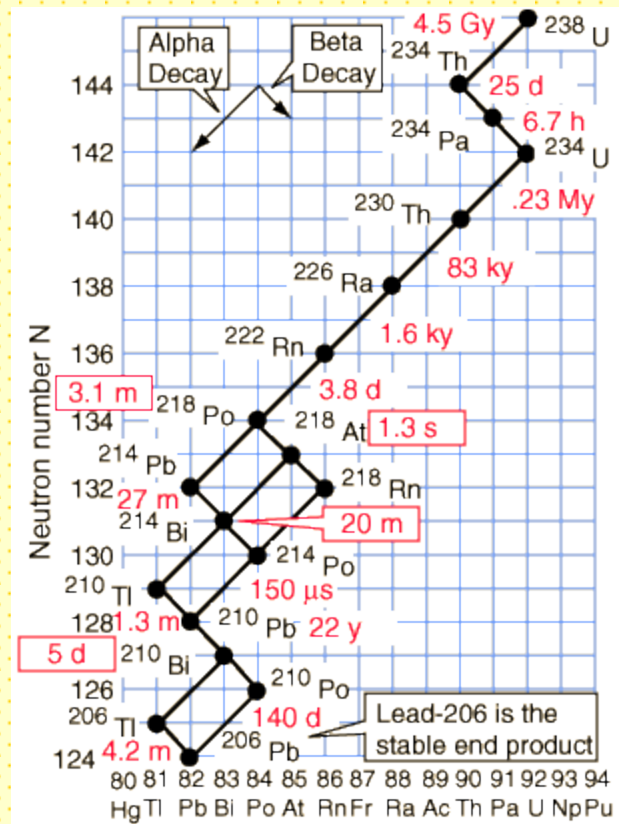
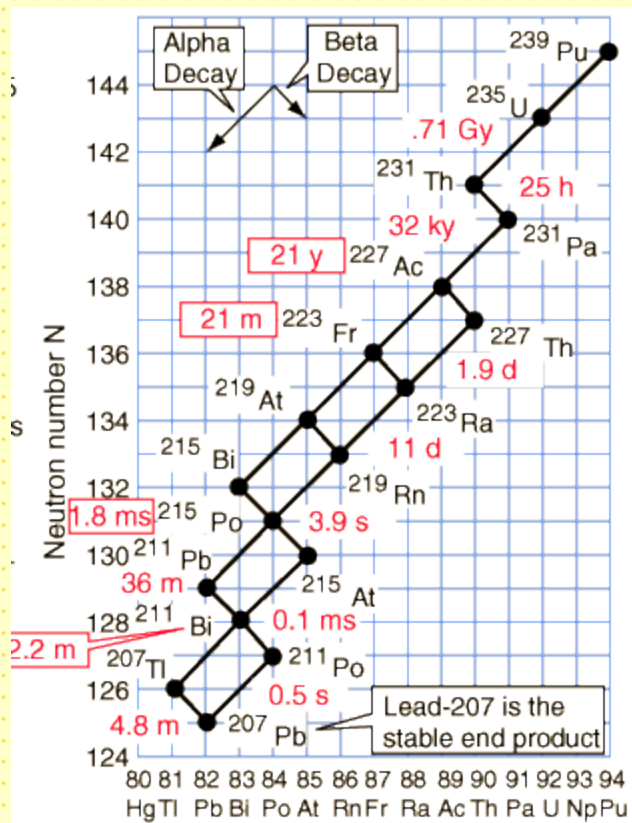
La otra comienza con el ^{232}Th y termina en el ^{208}Pb .



Cadenas radioactivas naturales



Cadenas radioactivas naturales



Datación con ^{14}C

La desintegración β^- del ^{14}C se usa para datar muestras orgánicas.

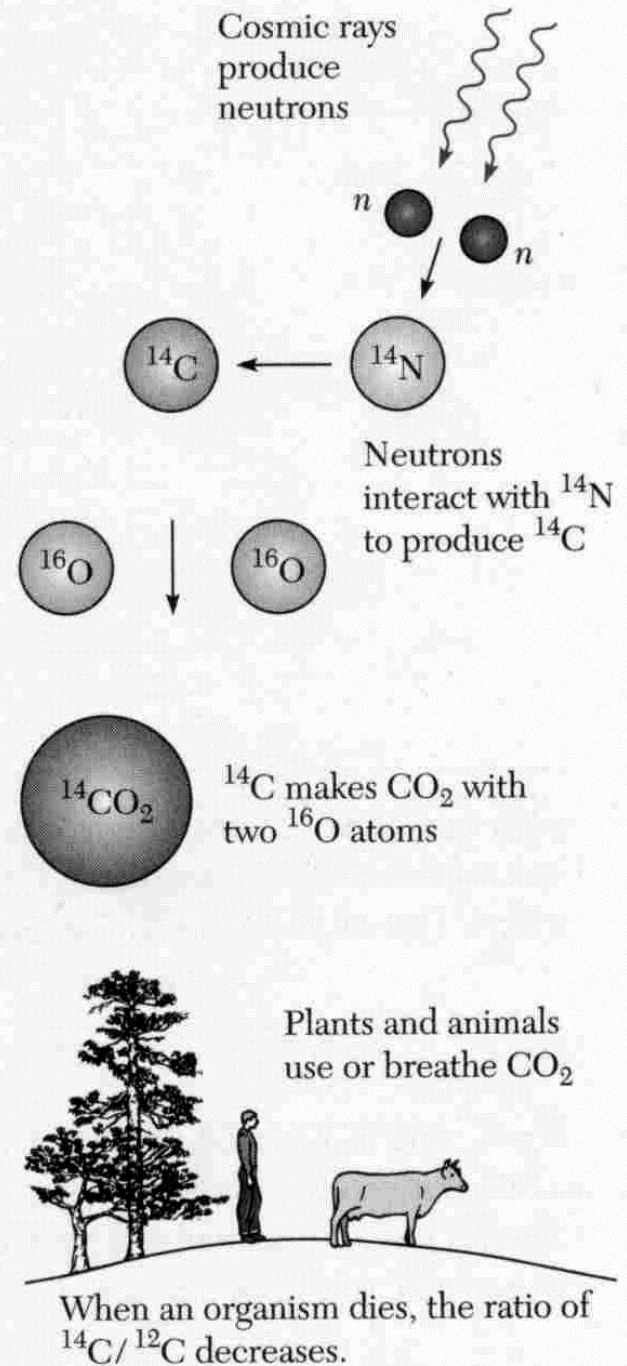


^{14}C se produce en la atmósfera superior a partir de las reacciones producidas por los rayos cósmicos. Se combina con el oxígeno para formar CO_2 y se encuentra que $^{14}\text{C}/^{12}\text{C} = 1,3 \times 10^{-12}$

La asimilación del carbono por los organismos vivos guarda esta relación.

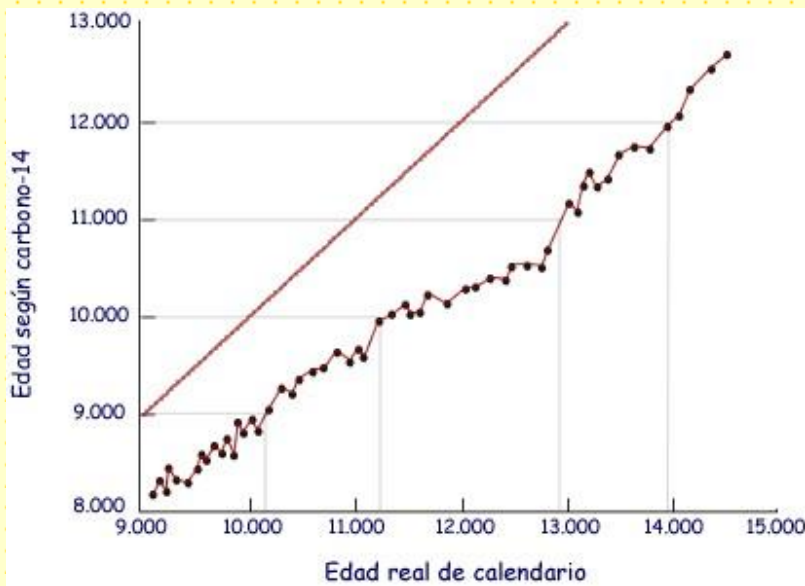
Cuando el organismo muere ($t=0$), la relación $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ disminuye por la desintegración del ^{14}C (^{12}C es estable).

Se estima la antigüedad del material a partir de la actividad remanente del ^{14}C . Método efectivo para 1,000 a 25,000 años de antigüedad,



Datación con ^{14}C

Se conocen, mayor o menor precisión, las variaciones en la relación $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ en los últimos 11.800 años (dendrocronología).



Curva de correspondencia entre la edad real y la edad por ^{14}C desde el 9.000 al 15.000 antes del presente, según mediciones en Cariaco.

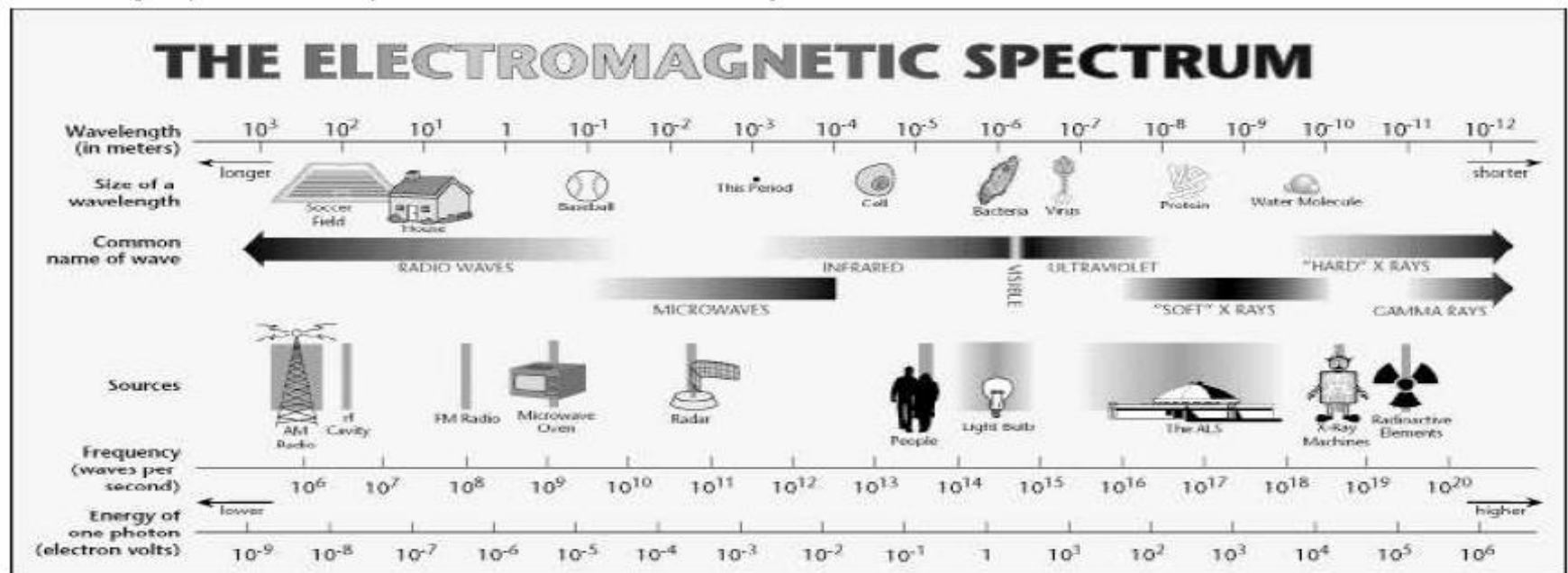


Radiación ionizante.

La energía para producir una ionización es de unas pocas decenas de eV.

$$E_{\gamma} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1239.8 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{\lambda}$$

Radiaciones con longitud de onda menor a 300 nm serán ionizantes (se toma en general a partir de 400 nm por el bajo poder de penetración de radiaciones con longitudes de onda menor a 400 nm).



Radiaciones con longitud de onda menor a 300 nm serán ionizantes (se toma en general a partir de 400 nm por el bajo poder de penetración de radiaciones con longitudes de onda menor a 400 nm).

Radiación ionizante.

