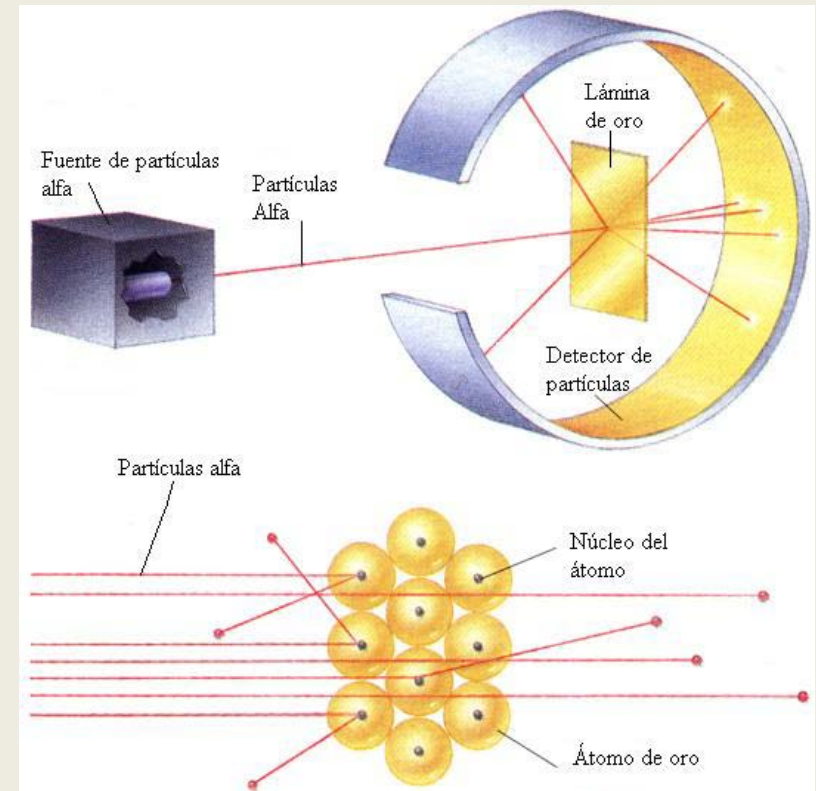
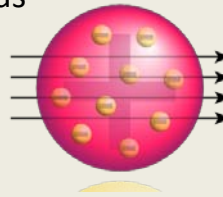


Tema 6. ESTRUCTURA NUCLEAR

- Introducción
- Experimento de Rutherford. Existencia del núcleo
- Partículas nucleares
- Tamaño y densidad del núcleo
- Energía de enlace y estabilidad nuclear
- Desintegración radiactiva
- Radiactividad α, β, γ
- Series radiactivas
- Reacciones nucleares

Experimento de Rutherford (1909)

- Bombardeo con un haz de partículas α una lámina fina de Au.
- Modelo de THOMPSON: la carga positiva y los electrones se distribuyen homogéneamente dentro del átomo. Las partículas α atravesarían la lámina de Au sin apenas desviarse. Las partículas α son masivas ($8.000 m_e$) y llevan gran velocidad. Por ello, las fuerzas eléctricas serían insuficientes para desviarlas.
- Observación: Un pequeño porcentaje de partículas se retrodispersan (aprox. 1 de cada 8.000). Rutherford: "tan sorprendente como si le disparases balas de cañón a una hoja de papel y rebotasen hacia ti".
- El que la mayoría de las partículas atraviesen la hoja metálica, indica que gran parte del átomo está vacío. Y el rebote de las partículas α indica una interacción directa con algo cargado positivamente y a la vez muy másico.



MODELO ATOMICO DE RUTHERFORD : el átomo está formado por un núcleo y una corteza . El núcleo tiene carga positiva, un radio muy pequeño y en él reside casi toda la masa del átomo. La corteza está formada por una nube de electrones que orbitan alrededor del núcleo.

Radio atómico del orden de 10^4 veces el Radio nuclear

Partículas nucleares

El núcleo posee solo 2 tipos de partículas: neutrones n y protones p.

Protón con carga +e y neutrón sin carga

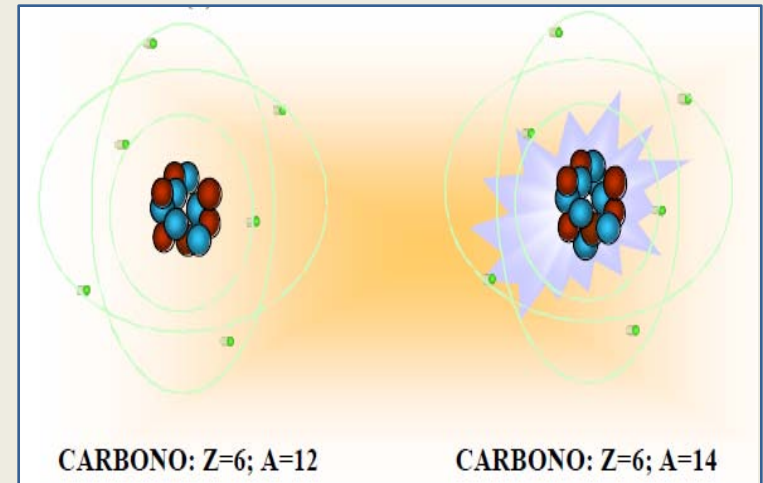
Masas muy similares: m_n es 0.2% mayor que m_p .

Z = número atómico = nº de protones (= nº de electrones en átomos neutros)

A = número másico = N + Z = nº total de nucleones

Una especie nuclear se denomina nucleido

- **Isótopos:** Son aquellos nucleidos que teniendo igual número atómico Z tienen distinto nº de neutrones (distinta masa y distinto número másico A)
- Los isótopos de un mismo elemento poseen las mismas propiedades químicas, pues éstas solo dependen de los electrones en la corteza (nº electrones = Z)
- Los isótopos tienen distintas propiedades nucleares. Por ejemplo, el ^{12}C es estable, mientras el ^{14}C es radiactivo.



Abundancia natural: Porcentaje de cada isótopo en la naturaleza.

H (Z=1): ^1H (1p): 99,985%

deuterio ^2H : (1p + 1n): 0,014%

tritio ^3H : (1p+ 2n): despreciable (radiactivo)

U (Z=92):

^{238}U (92p + 146n): 99,276%

^{235}U (92p + 143n): 0,720%

^{234}U (92p + 142n): 0,0054%



Todos radiactivos

O (Z=8):

^{16}O (8p + 8n): 99,762%

^{17}O (8p + 9n): 0,038%

^{18}O (8p + 10n): 0,200%

Fuerzas nucleares: Dentro del núcleo, los nucleones ejercen una fuerza atractiva muy intensa sobre sus vecinos más próximos.

- Fuerza nuclear fuerte o fuerza hadrónica
- F. Nuclear (N-N) $\gg \gg$ F. electr (p-p) $\gg \gg$ F. gravit (despreciable en F. Nuclear)
- FN (p-p) = FN (n-n) = FN (p-n)
- Muy corto alcance (Nula para distancias de algunos fm (1 fm = 10^{-15} m))

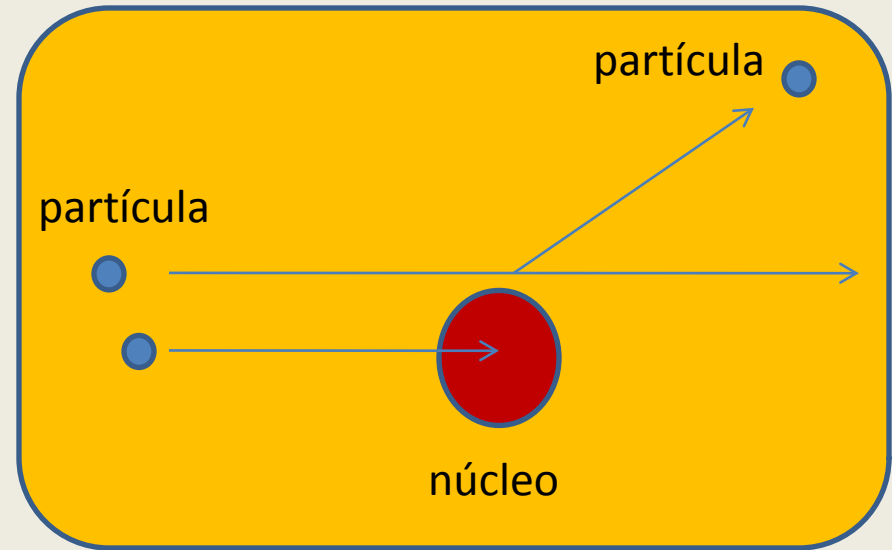
Tamaño nuclear y densidad

- El tamaño y forma de los núcleos se determina mediante experimentos de dispersión de partículas con núcleos:
 - Electrones \rightarrow distribución de carga
 - Neutrones \rightarrow distribución de materia (nucleones)
- La mayoría de los núcleos son esféricos con radios nucleares dados por:

$$R = R_0 A^{1/3} \quad (R_0 = 1,2-1,4 \text{ fm})$$

- El volumen nuclear es proporcional al nº de nucleones

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi R_0^3 A$$



La densidad nuclear es aproximadamente la misma para todos los núcleos

$$\rho = A / V = 3 / (4 \pi R_0^3) = 1,38 \cdot 10^{38} \text{ nucl/cm}^3$$

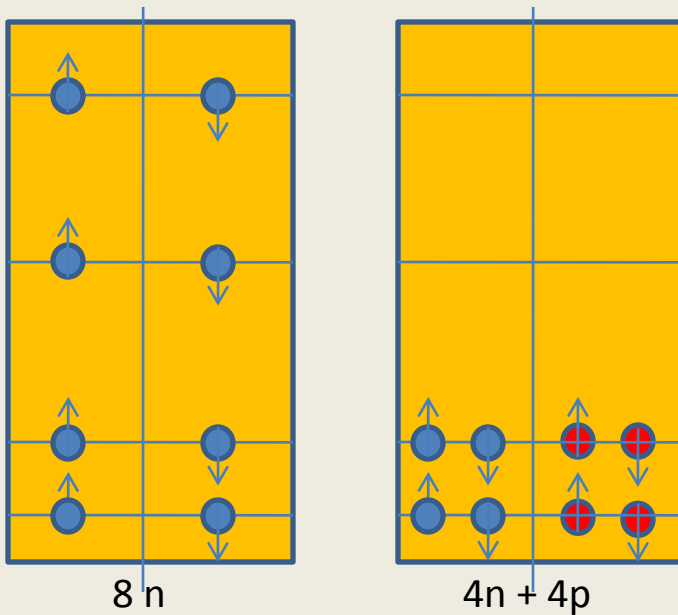
$$\rho \text{ aprox. } 2,3 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3$$

Análogo a una gota líquida: igual densidad con independencia del tamaño (fuerzas de corto alcance)

Modelo de la gota líquida (fisión nuclear)

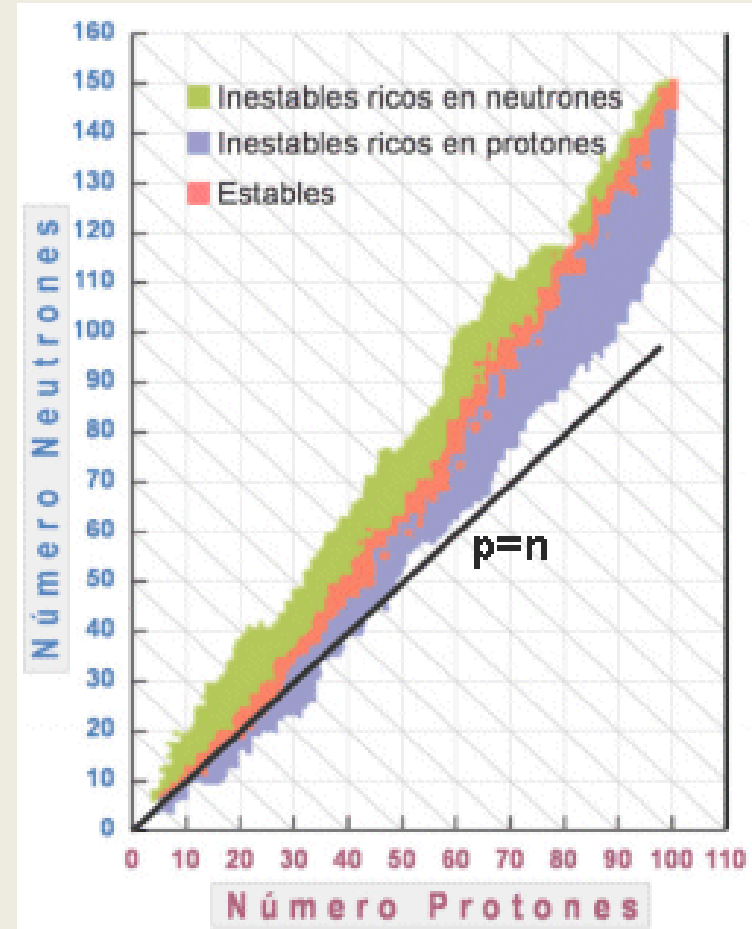
Estabilidad nuclear

- Núcleos ligeros: estabilidad con $N = Z$
Ejemplo: $A = 8$



La situación ($4n + 4p$) es más estable (el principio de exclusión de Pauli solo se da con partículas idénticas)

- Núcleos pesados: estabilidad con $N > Z$
(para minimizar la repulsión coulombiana entre protones)



Masa y energía de enlace nuclear

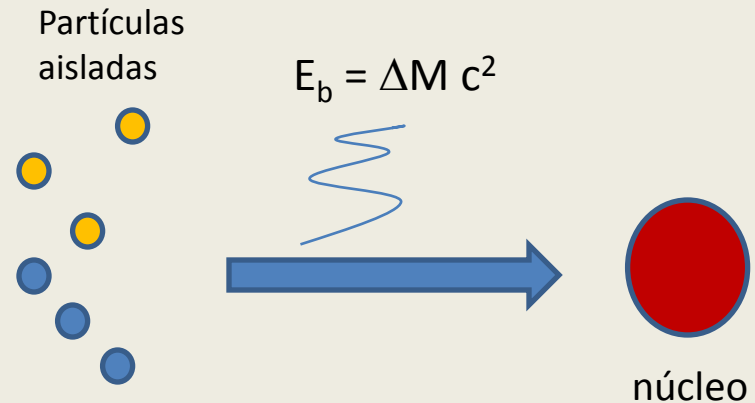
- La masa de un núcleo es menor que la suma de la masa de sus constituyentes.

$$M_N(Z, A) < Z m_p + (A-Z) m_n$$

- Cuando 2 o más nucleones se unen entre sí para formar un núcleo, parte de la masa se pierde y se transforma en energía, que se desprende. Esta energía es la energía de enlace del núcleo.

$$E_b = [Z m_p + (A-Z) m_n - M_N(Z, A)] c^2$$

- Inversamente, para dividir un núcleo en sus nucleones individuales hay que aportar esa energía, que se transformará en masa, aumentando la masa de los nucleones.



$$1 \text{ u} = (1/12) M_a(^{12}\text{C})$$

$$(1 \text{ u}) c^2 = 931,5 \text{ MeV}$$

Expresión aproximada

$$E_b = (Z M_H + (A-Z) m_n - M_A) c^2$$

(se cancelan las masas electrónicas)

Ejemplo: ${}^4\text{He}$ ($Z = 2$)



$$M_H = 1,007825 \text{ u}$$

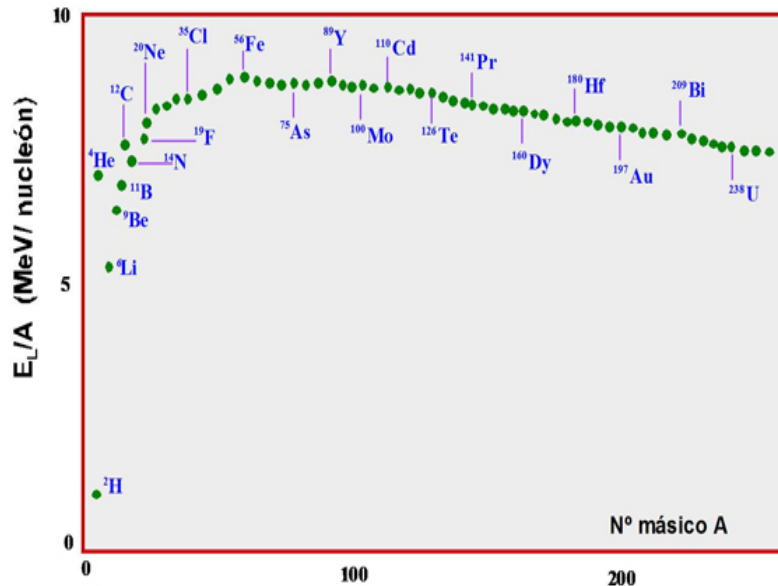
$$M_A ({}^4\text{He}) = 4,002603 \text{ u}$$

$$m_n = 1,008665 \text{ u}$$

Expresión aproximada

$$E_b = [Z M_H + (A-Z) m_n - M_A ({}^4\text{He})] c^2 =$$

$$= 0,030377 \text{ u} \times 931,5 \text{ MeV/u} = 28,30 \text{ MeV}$$



- Energía de enlace por nucleón E_b/A
- Gráfica de E_b/A frente a A

- Valor medio del orden 8,3 MeV
- Aprox. horizontal para $A > 50$: E_b proporc. a A



Cada nucleón solo es atraído por sus vecinos mas próximos (Saturación de la fuerza nuclear).
Densidad nuclear constante.

(Si cada nucleón se enlazara con todos los nucleones del núcleo, cada nucleón tendría $A-1$ enlaces y el nº total de enlaces sería $A(A-1)$. La E_b no sería cte.)

$A > 50$: pendiente negativa debida a la fuerza de Coulomb (aumenta como Z^2), que disminuye la energía de enlace.

$A < 50$: La función va creciendo con A como consecuencia del aumento del número de nucleones vecinos.

- $A > 300$, la fuerza de Coulomb es tan grande que el núcleo es inestable y se fisiona espontáneamente.

Radiactividad

- Muchos núcleos son radiactivos: se desintegran en otros núcleos mediante emisión de partículas: fotones, electrones, partículas α , neutrones, protones.
- La desintegración radiactiva es un proceso estadístico (estocástico): solo conocemos la probabilidad de que un núcleo se desintegre en cierto intervalo de tiempo.
- λ = constante radiactiva de un núcleo= probabilidad de que se desintegre en un intervalo de tiempo.

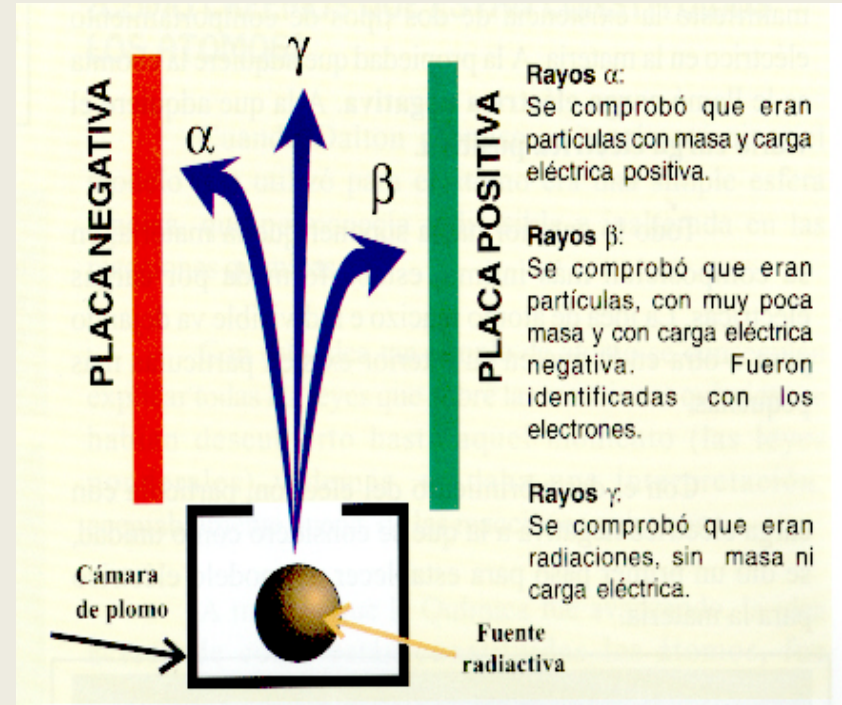
$$dN = -\lambda N dt$$

$$\ln N = -\lambda t + C$$

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

Actividad (A) = velocidad de desintegración

$$A(t) = -dN/dt = \lambda N(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t}$$



La velocidad de desintegración no es constante, sino que va disminuyendo exponencialmente.

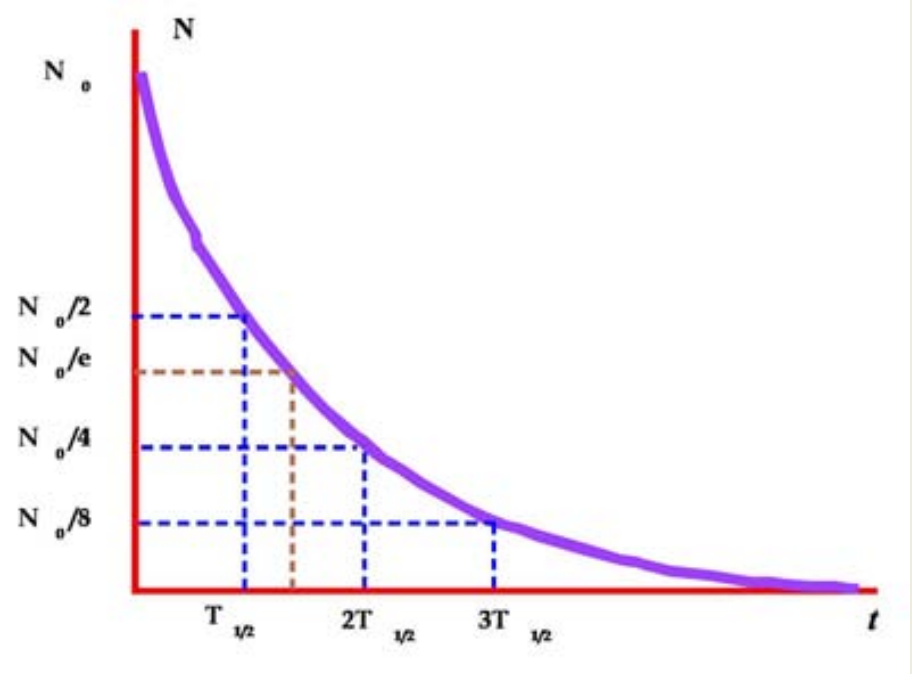
Radiactividad

- **Tiempo de vida media:** $\tau = 1/\lambda$
(tiempo para que N se reduzca a N_0/e)
(37%)
- **Periodo de semidesintegración:** tiempo necesario para que el nº de núcleos o la actividad se reduzca a la mitad

$$N_0/2 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0,693 \tau$$

- Los $T_{1/2}$ varían desde valores muy pequeños ($< \mu s$) a valores muy grandes (10^{16} años)



Unidades de Actividad

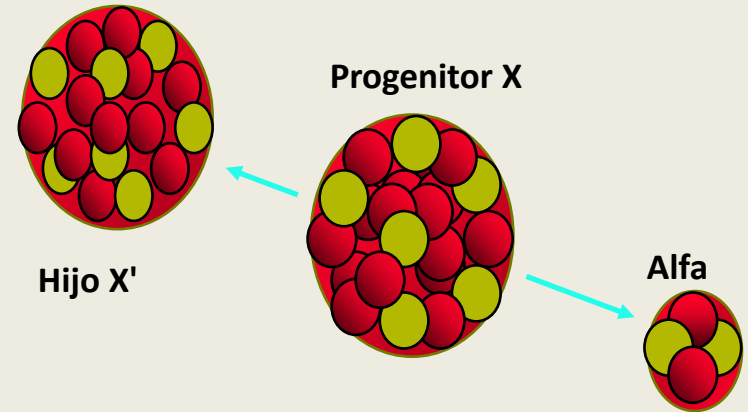
(SI) (Bequerelio) 1 Bq = 1 desintegracion/s

(Curie) 1 Ci = $3,7 * 10^{10}$ des/s (Bq)

El Curie es equivalente a la actividad que emite 1 gramo de Radio. Es una unidad muy grande. Se usan el mCi, μ Ci, etc

DESINTEGRACIÓN α

- Naturaleza de la radiación: núcleos de ${}^4\text{He}$ (Rutherford, 1909)
- El núcleo con Z, A se transforma en un núcleo con $(Z-2)$ y $(A-4)$
- Todos los núcleos pesados ($Z > 83$) son teóricamente inestables frente a la emisión α , ya que la masa del núcleo es mayor que la de los productos: núcleo hijo y partícula α



Conservación de masa-energía

$$m_x c^2 = m_{x'} c^2 + T_{x'} + m_{\text{alfa}} c^2 + T_{\text{alfa}}$$

$$(m_x - (m_{x'} + m_{\text{alfa}})) c^2 = T_{x'} + T_{\text{alfa}} = Q > 0$$

PROCESO
ESPONTÁNEO

Ejemplo: ${}^{232}\text{Th}$ \rightarrow ${}^{228}\text{Ra} + \alpha$

$$M_a ({}^{232}\text{Th}) = 232,038124 \text{ u}$$

$$M_a ({}^{228}\text{Ra}) = 228,031139 \text{ u}$$

$$M_\alpha = 4,002603 \text{ u}$$

$$Q = [0,004382 \text{ u} \times 931,5 \text{ MeV/u} = 4,08 \text{ MeV}$$

Conservación del momento

$$\vec{p}_{x'} = - \vec{p}_{\text{alfa}} \quad (T = p^2 / 2m)$$

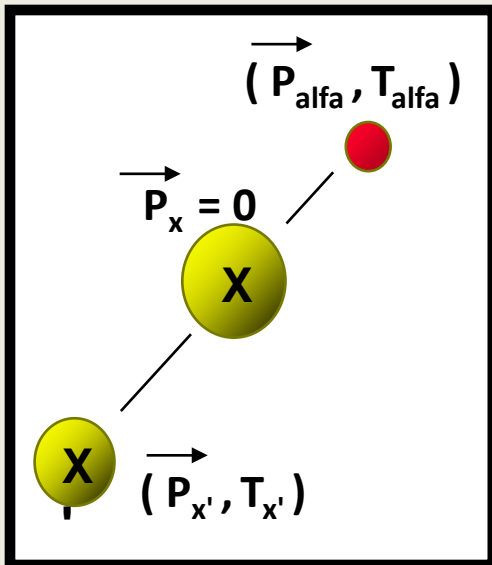
$$m_{\text{alfa}} T_{\text{alfa}} = m_{x'} T_{x'}$$

$$T_{\text{alfa}} = \frac{Q}{1 + (m_{\text{alfa}}/m_{x'})} = Q (1 - (4/A))$$

(A >> 4)

T_{alfa} (98% Q)

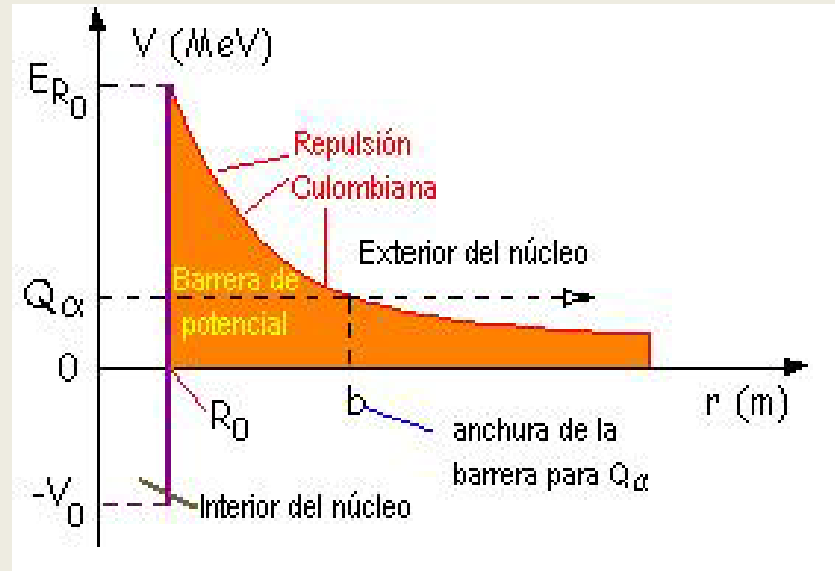
$T_{x'}$ (2% Q)



- E_{α} (entre 4 y 8 MeV)
- $T_{1/2}$ (entre 10^{-5} s y 10^{10} años): esta enorme variación fue explicada por Gamow (1928)

• **Teoría Gamow:** la partícula α se forma dentro del núcleo y luego escapa por efecto túnel a través de la barrera de Coulomb. Un incremento de Q reduce la altura y anchura de la barrera, y por tanto una mayor probabilidad de penetrarla

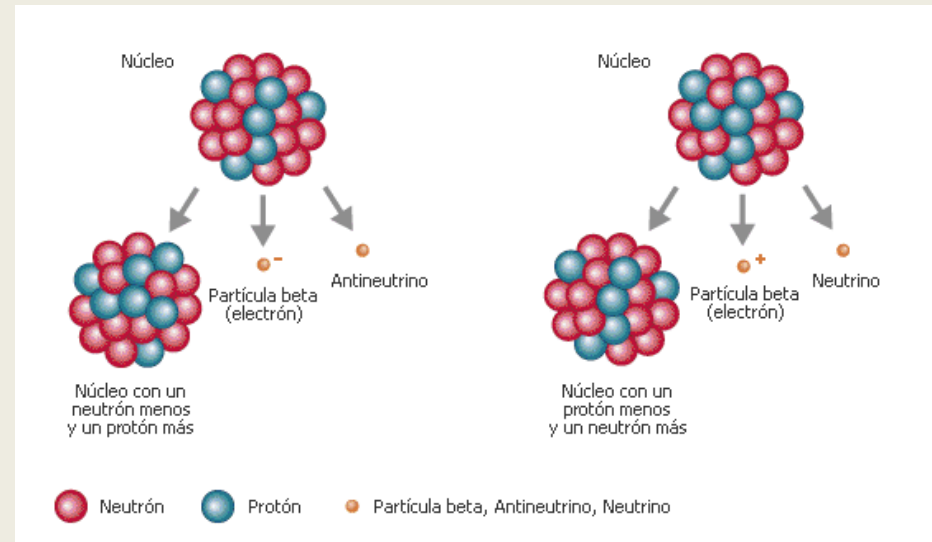
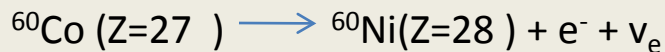
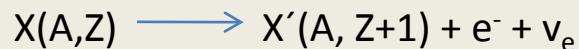
- E_{α} aumenta \rightarrow λ aumenta \rightarrow $T_{1/2}$ disminuye



DESINTEGRACIÓN β

- Tiene lugar en los núcleos que presentan un exceso o defecto de neutrones para conseguir la estabilidad
- No se modifica el número másico A. Solo el Z.
- Emisión β^- : $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$

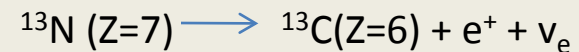
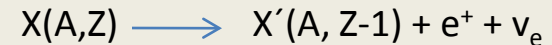
Este proceso ocurre espontáneamente para neutrones libres, con un $T_{1/2} = 10,8$ min.



- Emisión β^+ : $p^+ \rightarrow n + e^+ + \nu_e$

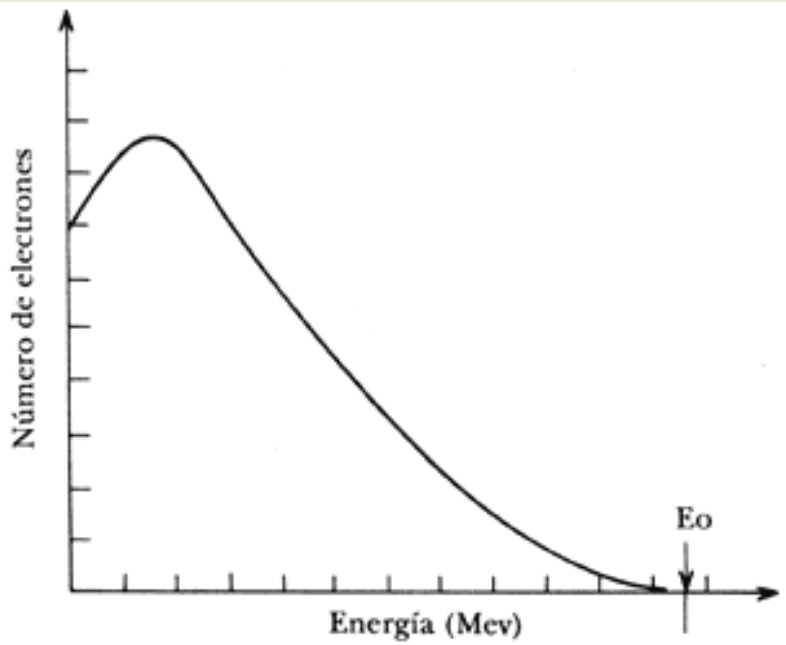
Este proceso está prohibido para protones libres. Implicaría una violación del principio de conservación de la energía (la suma de las energías de los productos resultantes es mayor que la del protón)

Sin embargo, para protones ligados (formando parte de un núcleo), sí puede ocurrir



- Los electrones y positrones no existen dentro del núcleo, sino que se crean en el proceso.

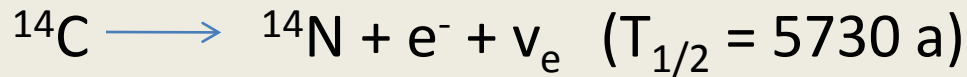
DESINTEGRACIÓN β



$$Q = [M(X) - M(X') - m_e] c^2 =$$
$$= T_{X'} + T_e + T_\nu$$

- La energía de los electrones o positrones emitidos por un nucleido no es un valor único fijo, sino que varía desde 0 hasta un cierto valor máximo. Es un **espectro continuo**
- **Explicación (1930, Pauli)**: Sugiere que una tercera partícula (neutrino) se emite simultáneamente en el proceso de desintegración. Esta partícula tiene una masa en reposo nula y no es “observable”.
- Así, la energía disponible se reparte en energía cinética de **3 partículas** (y no de 2). La energía cinética que se lleva el núcleo es despreciable, debido a su gran masa.
- **1948**: Evidencia de la existencia de una tercera partícula para confirmar la conservación de la cantidad de movimiento
- **1957**: Observación experimental del neutrino.
- Actualmente, sabemos que la **masa del neutrino es extremadamente pequeña**, pero no nula
- Existen **tres tipos de neutrinos**, con sus respectivas antipartículas: neutrino electrónico, muónico y tauónico.

Datación radiactiva (^{14}C)

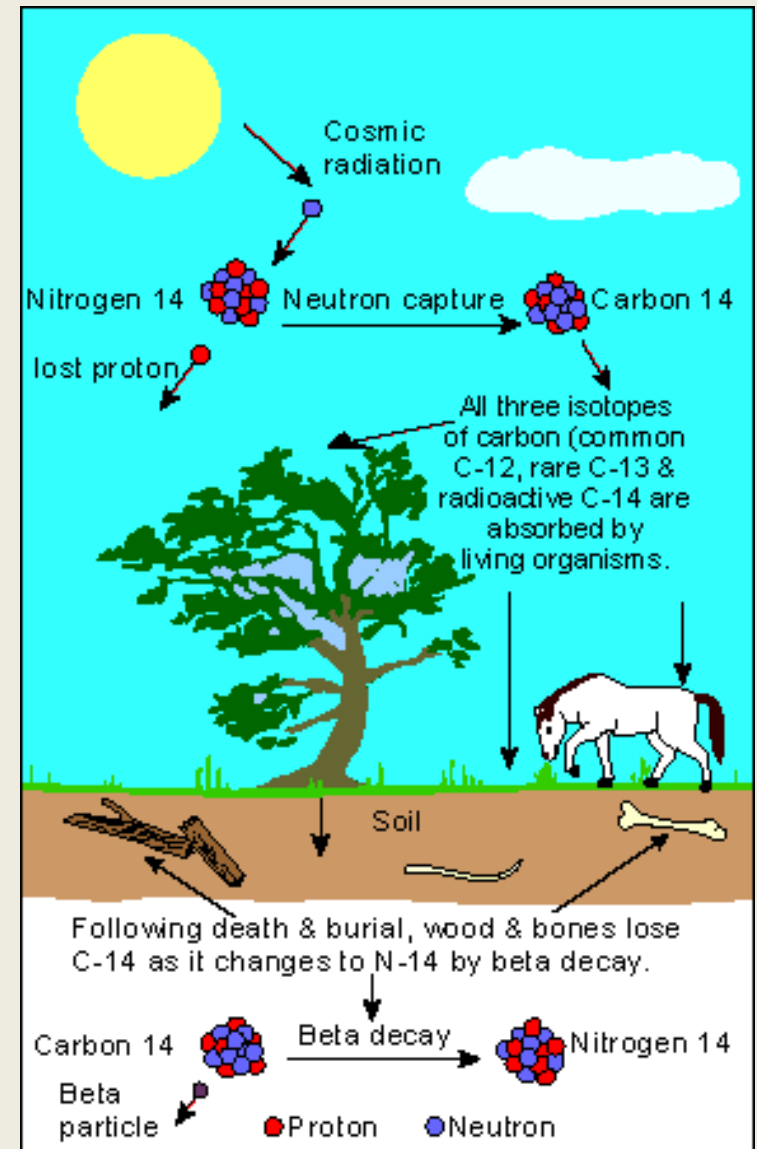


- El ^{14}C se produce continuamente en la atmósfera terrestre a partir de reacciones nucleares originadas por los rayos cósmicos.
- Los organismos vivos intercambian CO_2 con la atmósfera, por lo que la relación de ^{14}C a ^{12}C en ellos es la misma relación que en la atmósfera ($1,3 \times 10^{-12}$).
- Cuando el organismo muere, la absorción de C se detiene, y la relación ^{14}C a ^{12}C va decreciendo debido a la desintegración del ^{14}C .
- Concentr. equilibrio (org. vivo): $C_{\text{eq}} = 15 \text{ dpm / gr. C}$

$$C(\text{Actual}) = C_{\text{eq}}(0) e^{-\lambda T}$$

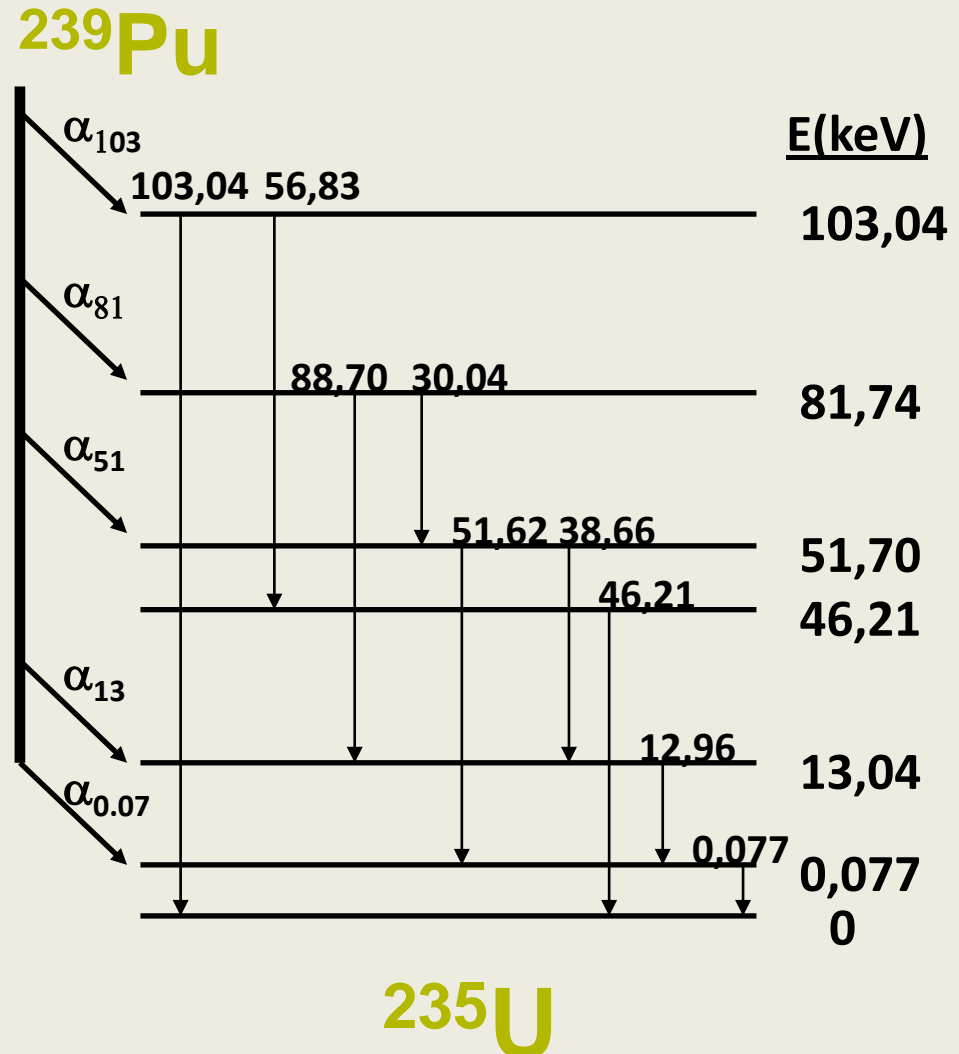
$$\lambda = (\ln 2)/5730 \text{ años}$$

$$T = \text{tiempo desde "defunción"}$$



Desintegración gamma

- Desintegración gamma : Un núcleo en un estado excitado se desexcita pasando a un estado de menor energía, mediante emisión de un fotón.
- Tras la desexcitación, el núcleo sigue siendo el mismo (Z y A no varían)
- Las energías entre niveles nucleares son del orden del MeV (en los átomos del orden del eV), por lo que los fotones gamma poseen energías desde 0,1 – 10 MeV
- La vida media de los emisores gamma es muy corta (del orden de 10^{-12} s o inferiores), por lo que no se observan directamente.
- Habitualmente, se observa una desintegración gamma, porque antes ha habido una desintegración α ó β , produciéndose el núcleo hijo en un estado excitado.
- Existen algunos nucleidos emisores gamma con vidas medias muy cortas, del orden de minutos o incluso horas: Se les denomina estados metaestables.

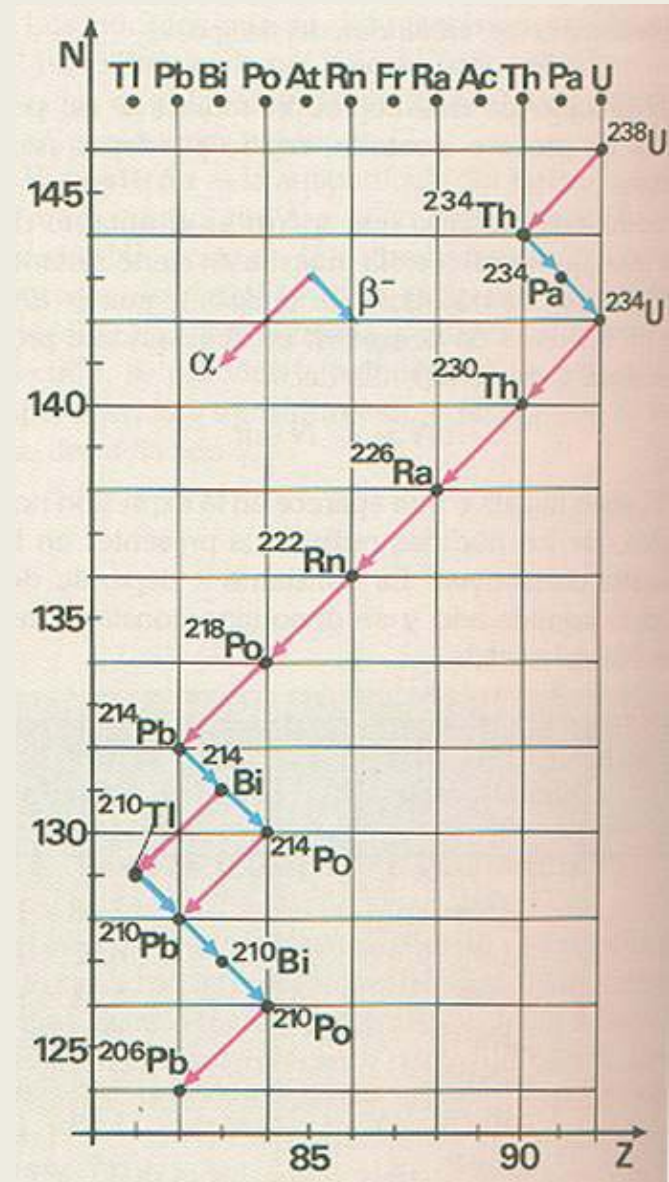


Series radiactivas

- Desintegración alfa : $Z-2$, $A-4$
- Desintegración beta: A no cambia , $Z+1$ o $Z-1$
- Todos los núcleos de una serie se diferencian en 4 unidades en A

Núm. de masa	Serie	Padre	Vida media en años
$4n$	Torio	${}_{90}^{232}$ Th	1.39×10^{10}
$4n + 1$	Neptunio	${}_{93}^{237}$ Np	2.25×10^6
$4n + 2$	Uranio	${}_{92}^{238}$ U	4.51×10^9
$4n + 3$	Actinio	${}_{92}^{235}$ U	7.07×10^8

- La serie $4n+1$, del Np no existe (desapareció), pues su nucleido de vida mas larga, el ${}^{237}\text{Np}$, tiene un $T_{1/2} \lll$ edad de la Tierra ($4,5 \cdot 10^9$ años)



Reacciones nucleares

- Para obtener información sobre los núcleos, éstos se bombardean con partículas y se observan los resultados.
- Los primeros experimentos se realizaron con fuentes de radiación natural. Después, empleando aceleradores de partículas (1931 acelerador Van de Graaf; 1932 Primer ciclotrón)
- Ejemplo: En 1932, Cockcroft y Walton, empleando protones acelerados artificialmente, consiguen la reacción:



Tipos de reacciones nucleares:

- **Dispersión elástica:** la partícula sufre una dispersión y el núcleo queda inalterado
- **Dispersión inelástica:** El núcleo queda en un estado excitado y, posteriormente, se desexcita emitiendo fotones.
- **Absorción:** la partícula es absorbida por el núcleo, y después pueden emitirse más partículas.

- **VALOR Q de la reacción:** cantidad de energía liberada o absorbida en la reacción.

$$Q = \left[\sum m_{\text{iniciales}} - \sum m_{\text{productos}} \right] c^2$$

- **Reacción exotérmica:** Se libera energía $Q > 0$.
- **Reacción endotérmica** ($Q < 0$) : para que la reacción se verifique hay que aportar energía
- En una reacción endotérmica, hace falta una energía mínima E_{min} para que se produzca.
- En el “sistema laboratorio”, $E_{\text{min}} > |Q|$, (los productos deben poseer una energía cinética mínima para conservar la cantidad de movimiento.

SECCION EFICAZ: $\sigma = R / N * I$

$I = n^{\circ}$ de partículas incidentes por unidad de tiempo y área
 $R = n^{\circ}$ de reacciones nucleares producidas por unidad de tiempo
 $N = n^{\circ}$ de núcleos que atraviesa el haz

- La sección eficaz tiene unidades de área, aunque su significado es “probabilidad”.

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