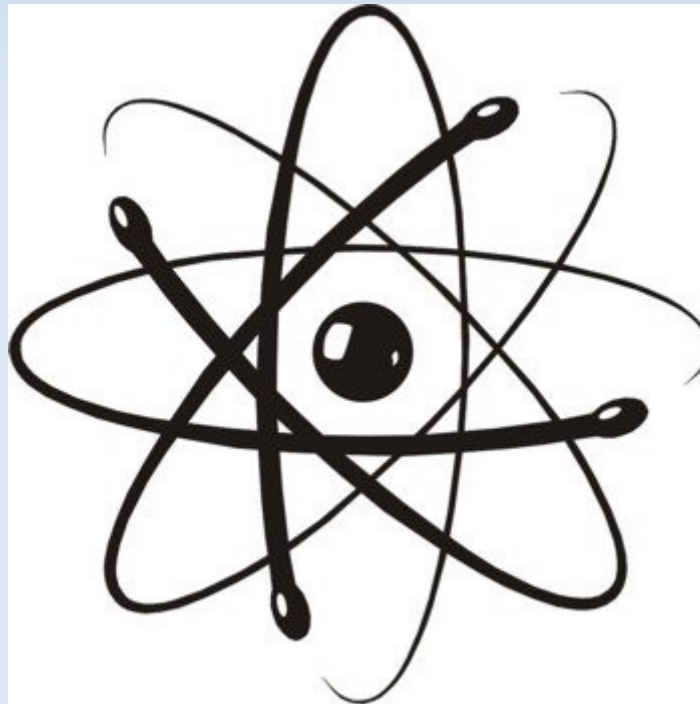


# Introducción a la Energía Atómica



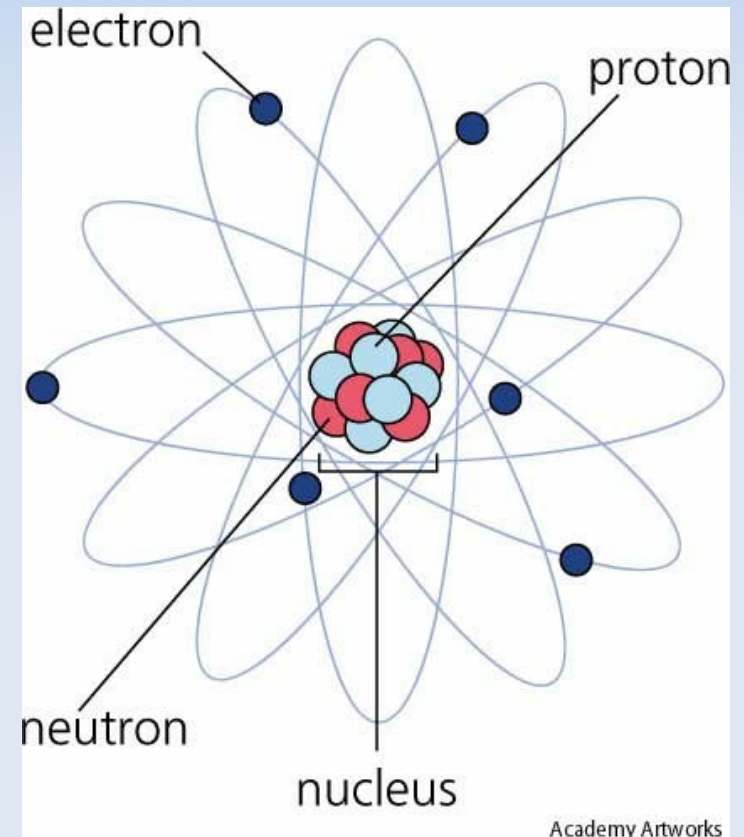
Juan José Gómez Navarro  
Departamento de Física

# Índice

1. El átomo y sus constituyentes
2. Energía de enlace
3. Fusión y Fisión nuclear
4. Reacciones nucleares
5. Reacciones en cadena

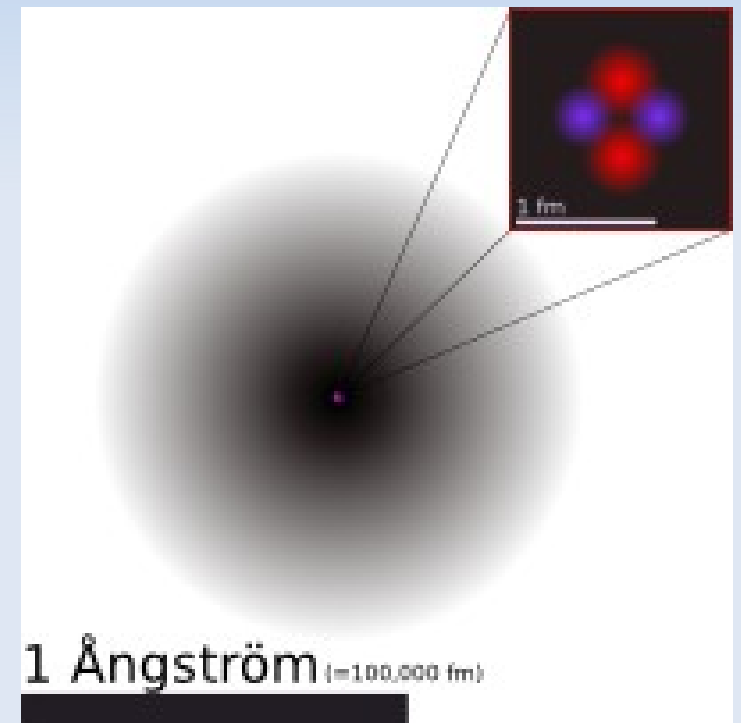
# 1. El átomo y sus constituyentes

- ✓ Átomo significa “indivisible”
- ✓ Su existencia no fue probada hasta el siglo XIX
- ✓ Es la unidad elemental en Química (indivisible químicamente)
- ✓ En el siglo XX se demostró que tiene estructura → **no es indivisible** (por medios físicos)



# 1. El átomo y sus constituyentes

- ✓ El átomo está formado por un **núcleo** rodeado de electrones
- ✓ El núcleo es 10 veces más pequeño que el átomo
- ✓ Está formado por protones y neutrones



# 1. El átomo y sus constituyentes

- ✓ El número de protones, **número atómico  $Z$** , determina las propiedades bioquímicas (y da nombre al átomo)
- ✓ Sin embargo, el núcleo puede tener diferente número de neutrones (isótopos)
- ✓ El **número másico  $A$**  es la suma de protones y neutrones
- ✓ El número másico determina las propiedades físicas del átomo: masa, **radiactividad**, ...

# 1. El átomo y sus constituyentes

- ✓ El núcleo concentra el 99% de la masa del átomo en un volumen ínfimo, luchando contra la fuerza de repulsión eléctrica
- ✓ ¿Qué mantiene unido a los protones?
- ✓ ¿Cuánta energía *cuesta*?

## 2. Energía de enlace

- ✓ La **fuerza nuclear fuerte** es una de las 4 interacciones fundamentales de la naturaleza
- ✓ Es de corto alcance  $\sim 1 \text{ fm}$  ( $10^{-15} \text{ m}$ )
- ✓ Muy intensa, capaz de vencer la fuerza de repulsión eléctrica
- ✓ Relacionada con el **defecto de masa**

## 2. Energía de enlace

- ✓ La masa de los nucleones se mide en unidades de masa atómica (uma):  $1 \text{ uma} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
- ✓ La masa de un núcleo NO es la suma de sus constituyentes: **defecto de masa**

$$\Delta m = Z \cdot (m_p + m_e) + (A - Z) \cdot m_n - M_{\text{átomo}}$$



## 2. Energía de enlace

- ✓ En relatividad, la masa es otra forma de energía.

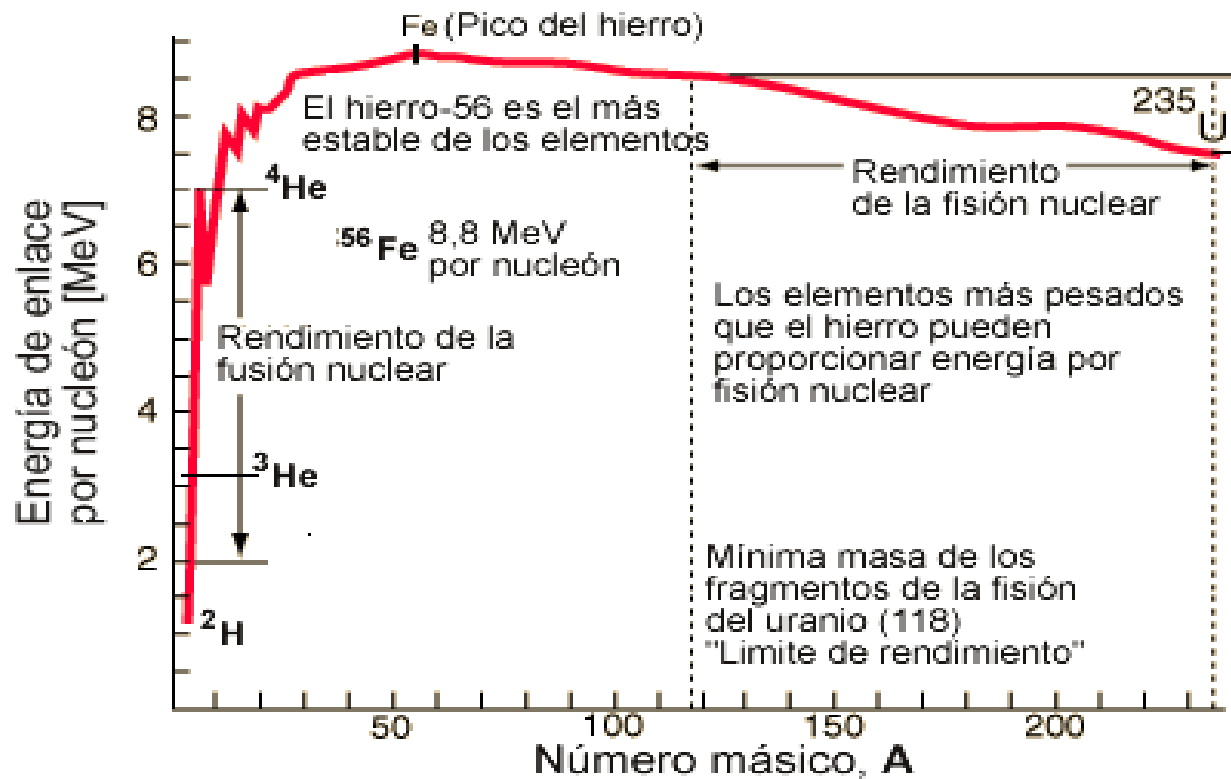
$$E = \Delta m \cdot c^2$$

- ✓ La masa se puede medir en unidades de energía
- ✓ Es habitual hablar de electrovoltios (eV)
- ✓  $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  (típica energía de enlace química de los electrones en los átomos)
- ✓  $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$  (típica energía de enlace nuclear)

## 2. Energía de enlace

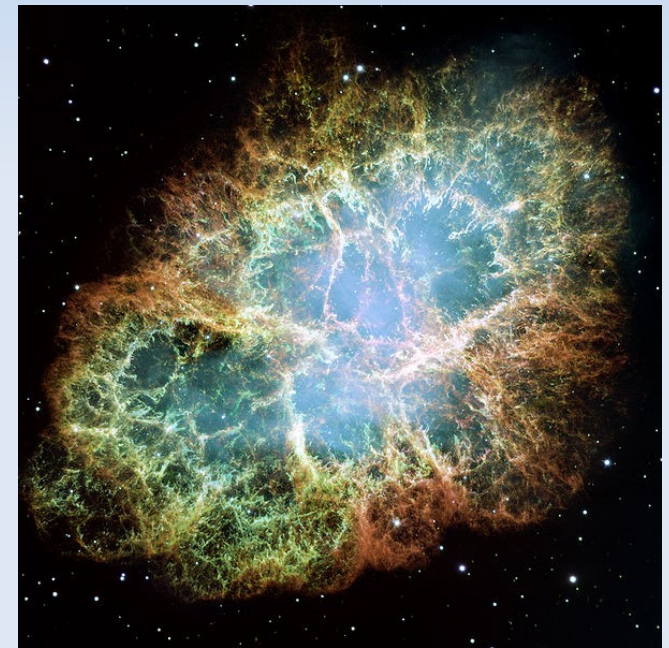
- ✓ El defecto de masa hace que para los nucleones sea favorable energéticamente fusionarse para dar lugar a núcleos complejos
- ✓ Se define la energía de enlace por nucleón como la energía debida al defecto de masa dividida por el número de nucleones

## 2. Energía de enlace



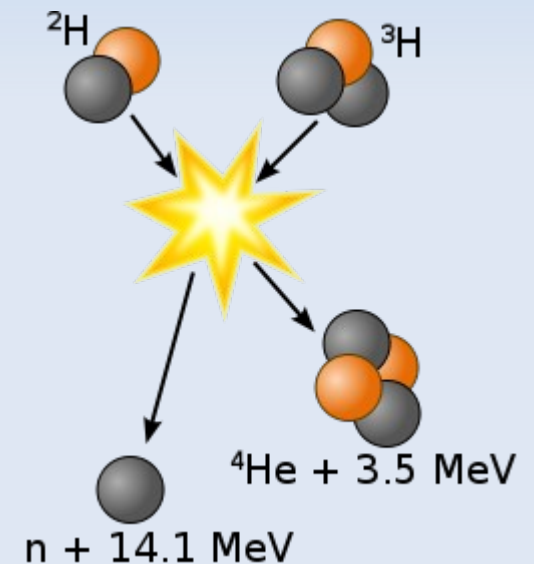
# 3. Fusión y Fisión nuclear

- ✓ El Big Bang sólo generó átomos ligeros
- ✓ La fusión de hidrógeno y helio en las estrellas generó los otros elementos (*somos polvo de estrellas*)
- ✓ Los elementos químicos más allá del hierro sólo se producen en supernovas (cataclismos estelares)



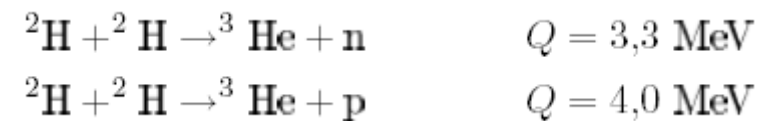
# 3. Fusión y Fisión nuclear

- ✓ La fusión nuclear es la unión de núcleos ligeros para dar lugar a núcleos más pesados
- ✓ La masa final ha de ser menor que la inicial → proceso exotérmico



# 3. Fusión y Fisión nuclear

- ✓ La fusión nuclear da lugar a elementos estables (cuanto más estables, más energía se libera)
- ✓ Suelen ser reacciones muy exotérmicas
- ✓ Hace falta una gran cantidad de energía inicial para vencer la repulsión eléctrica



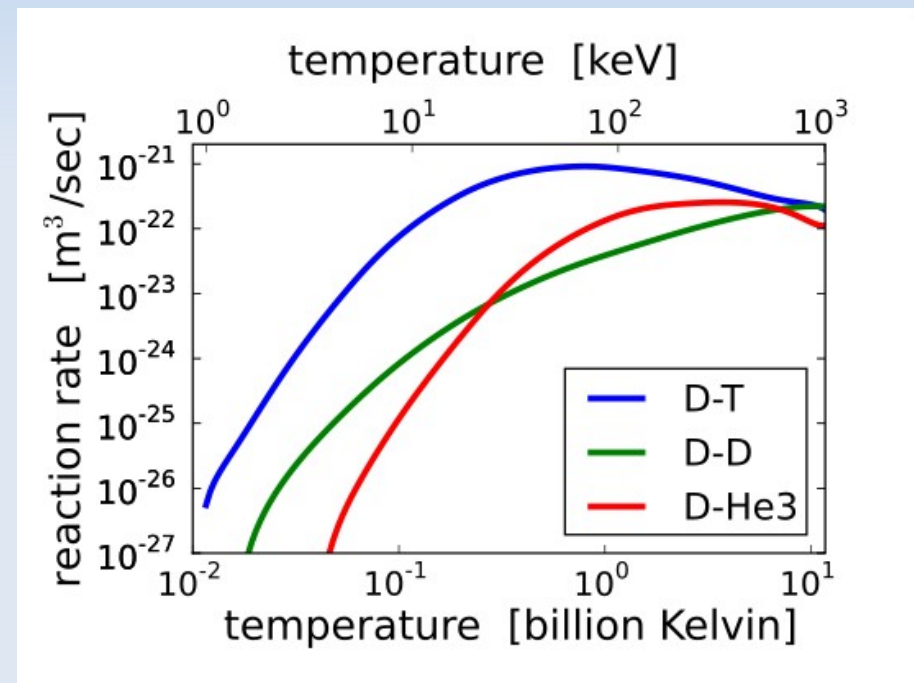
Reacciones deuterio-deuterio



Reacción deuterio-tritio

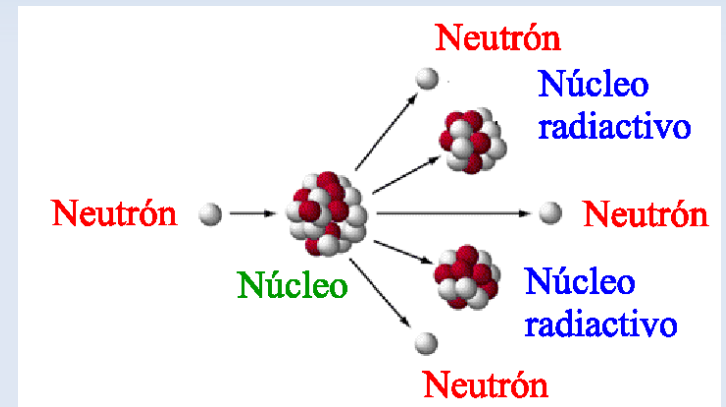
# 3. Fusión y Fisión nuclear

- ✓ La temperatura de los elementos a fusionarse ha de ser  $\sim 10^8$  K
- ✓ Materia en estado de plasma
- ✓ Necesidad de confinarlos
- ✓ **Todavía en desarrollo**



# 3. Fusión y Fisión nuclear

- ✓ La fisión nuclear es el proceso por el que un núcleo se fragmenta (fisiona) dando lugar a núcleos más ligeros
- ✓ Sólo ocurre en elementos pesados
- ✓ Puede ser espontánea o inducida



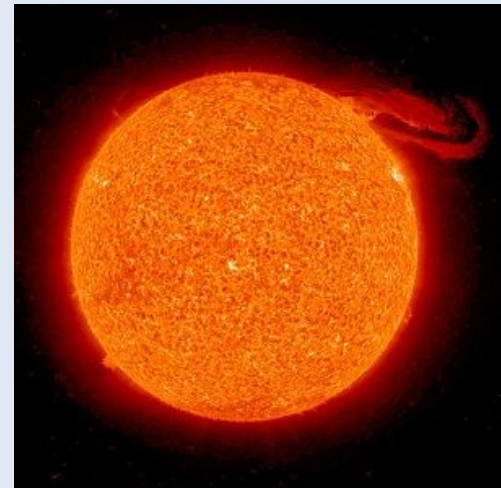


# 3. Fusión y Fisión nuclear

- ✓ Los productos de la fisión son otros núcleos y otros elementos muy energéticos: **radiactividad**
- ✓ La energía que se obtiene del defecto de masa se encuentra en la **energía cinética** de los productos de la reacción
- ✓ La energía cinética obtenida se puede utilizar para calentar fluidos para que muevan turbinas y generar electricidad (centrales nucleares)

# 4. Reacciones nucleares

- ✓ Una reacción química es un proceso donde unos átomos intercambian electrones
- ✓ Una reacción nuclear es similar, pero los que sufren el proceso son los núcleos, no los electrones
- ✓ Las reacciones nucleares son **mucho más energéticas**

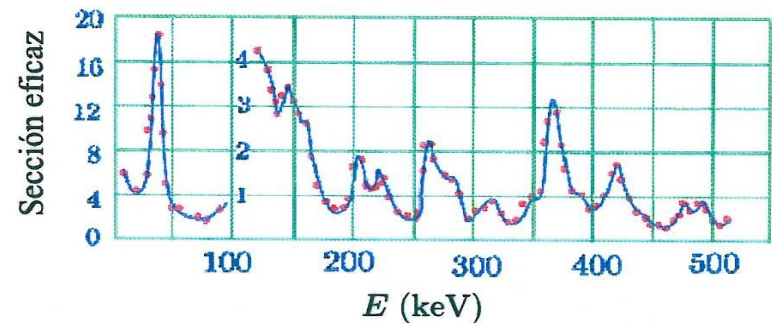


# 4. Reacciones nucleares

- ✓ Una reacción nuclear (fusión o fisión) es un proceso **estocástico**
- ✓ La **sección eficaz** es la probabilidad de que un determinado proceso ocurra
- ✓ Se miden en barns (unidad de área)
- ✓  $1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$

$$\sigma(x, y) = \frac{R_y}{I_x N}$$

N: # elementos expuestos  
I<sub>x</sub>: flujo incidente  
R<sub>y</sub>: # elementos producto



Sección eficaz de captura de neutrones del aluminio

# 4. Reacciones nucleares

- ✓ Hay isótopos inestables, que se fisionan de manera espontánea
- ✓ La probabilidad de que un núcleo se fisione en un determinado intervalo de tiempo es proporcional a su **constante de desintegración**  $\lambda$
- ✓ La vida media es el tiempo que ha de pasar para que la mitad de la muestra se fisione espontáneamente
- ✓ La **actividad** de un material es proporcional a esta constante

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

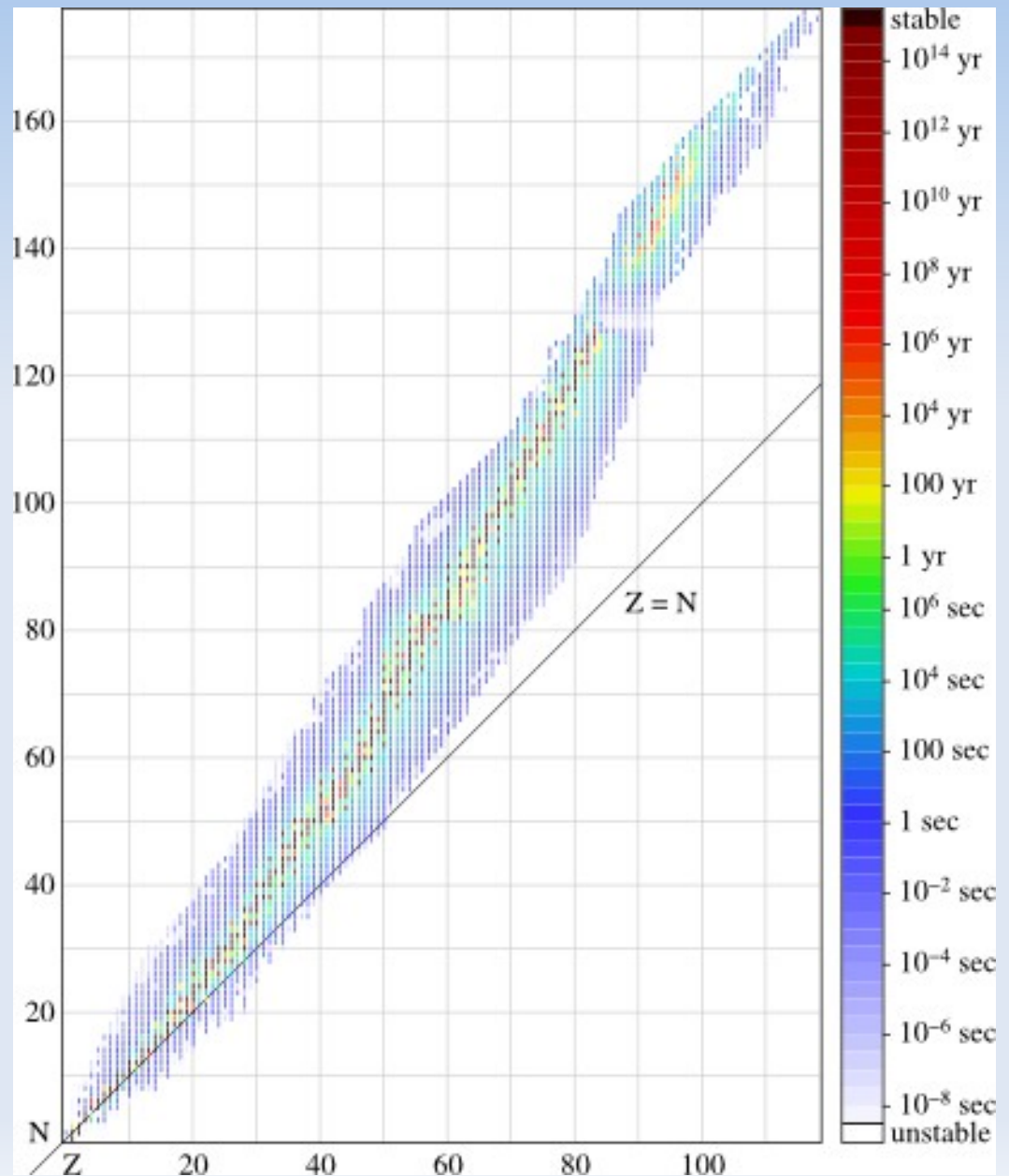
Ley de desintegración radiactiva

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Vida media

# 4. Reacciones nucleares

- ✓ Los isótopos estables se son una minoría en todas las posibles combinaciones
- ✓ En la Tierra hay *todavía* muchos isótopos inestables, que son fuente de **radiactividad natural**
- ✓ Además, se pueden crear artificialmente isótopos nuevos



# 4. Reacciones nucleares

✓ La fisión de isótopos produce radiactividad. Hay varios tipos de radiactividad:

- **radiación alfa**: son núcleos de helio (2p+2n) 
$${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + {}^4_2 \alpha$$

- **radiación beta**: son electrones rápidos productos de desintegración beta ( $n \rightarrow p + e^-$ )



- **radiación gamma**: fotones (radiación electromagnética)

- **radiación neutrónica**: neutrones rápidos

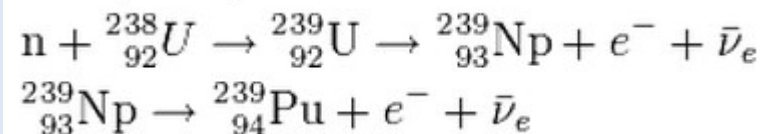
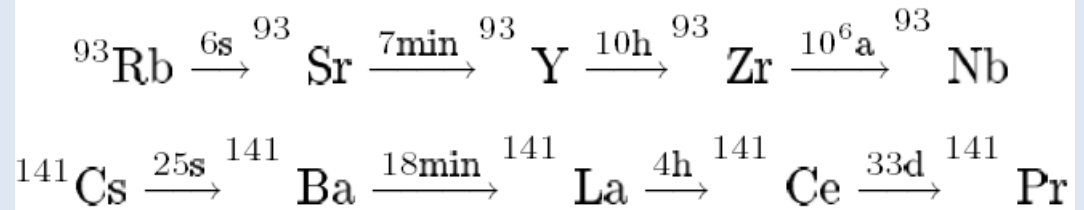
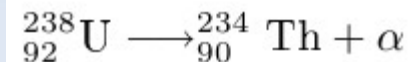
✓ Las reacciones nucleares satisfacen leyes de conservación:

- Energía (NO DE MASA)
- Momento lineal y angular
- Número atómico
- ...

# 4. Reacciones nucleares

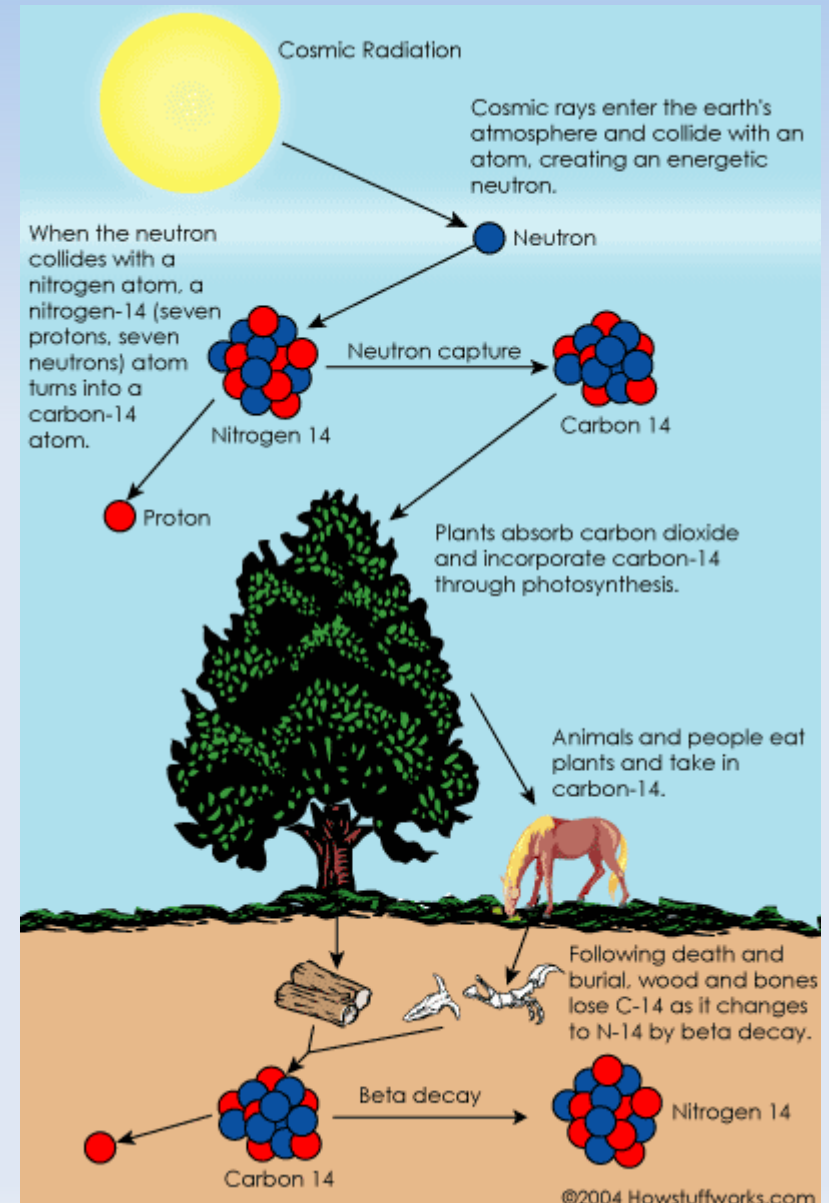
- ✓ Los isótopos radiactivos se van desintegrando en una cascada de desintegraciones, generando muchos isótopos intermedios
- ✓ Estas desintegraciones secundarias generan calor y radiactividad residual
- ✓ Se pueden generar isótopos que absorben electrones:

venenos nucleares



# 4. Reacciones nucleares

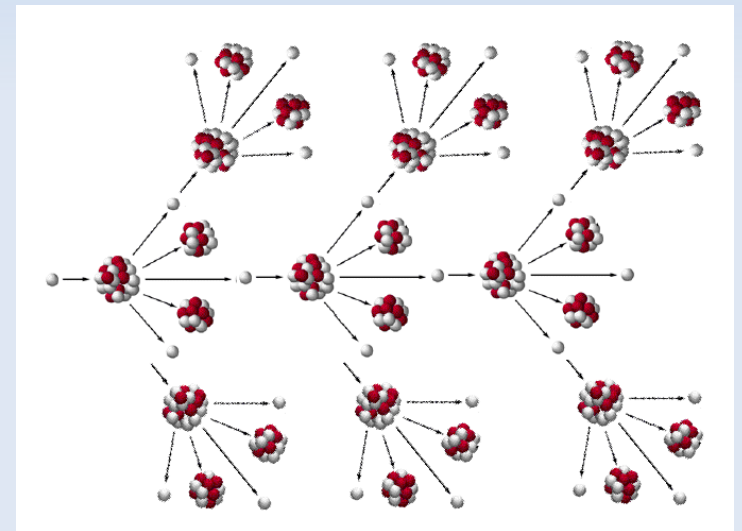
- ✓ Una reacción bien conocida y útil es la **desintegración del  $^{14}\text{C}$**
- ✓ Se forma en la alta atmósfera por la absorción de neutrones (vida media de 5730 años)
- ✓ Todos los seres vivos contenemos una parte en un trillón de  $^{14}\text{C}$
- ✓ Al morir, la proporción de  $^{14}\text{C}$  se va reduciendo, permitiendo **datar la muerte** del ser vivo





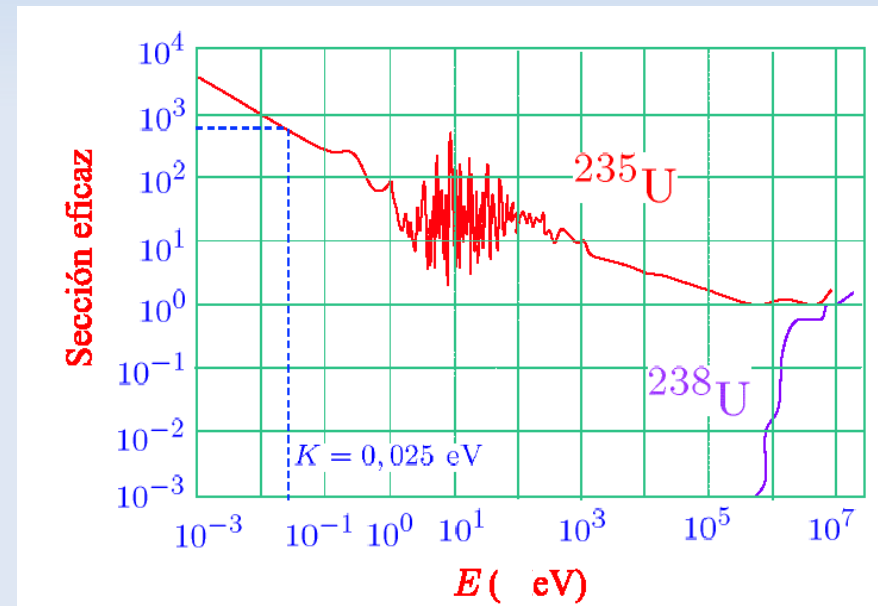
# 5. Reacciones en cadena

- ✓ Existen elementos pesados que se fisionan espontáneamente (**fisionables**)
- ✓ Hay elementos inestables a los que se puede forzar a fisionarse bombardeándolos con neutrones
- ✓ La fisión libera energía y más neutrones
- ✓ Estos neutrones secundarios pueden excitar más fisiones, iniciando una reacción en cadena que libera energía hasta que se agota el material fisible (**fisibles**)



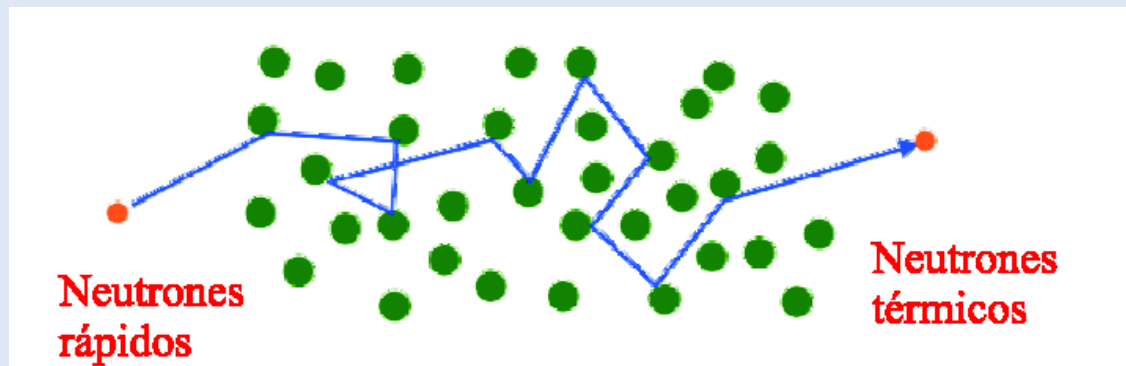
# 5. Reacciones en cadena

- ✓ Algunos isótopos requieren neutrones “lentos” para fisionarse:  
 $^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$
- ✓ Otros requieren neutrones con cierta energía umbral:  $^{238}\text{U}$ : (0,8 MeV)  
 $^{232}\text{Th}$  (1,2 MeV)
- ✓ El  $^{235}\text{U}$  es el único que existe en la naturaleza fisible por neutrones lentos (único elemento fisible natural)



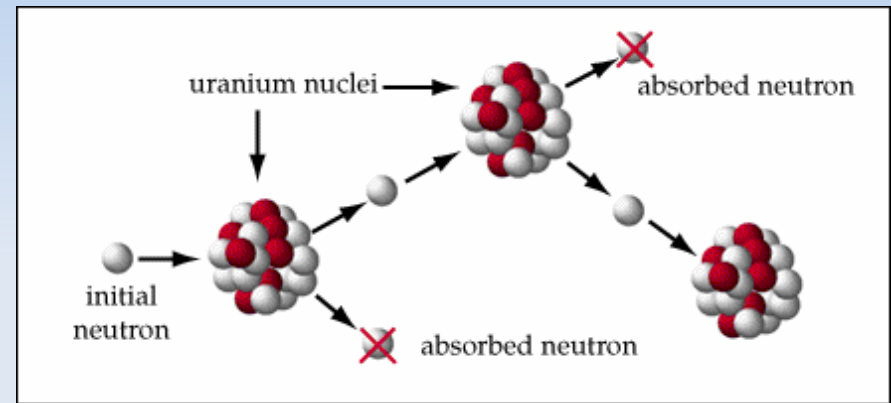
# 5. Reacciones en cadena

- ✓ Los neutrones emitidos son muy veloces (su energía cinética contiene una parte de la energía liberada en la fisión)
- ✓ Esta velocidad es excesiva (si queremos fusionar  $^{235}\text{U}$ ) y frena la reacción en cadena
- ✓ Una manera de aumentar la reactividad es la **moderación de neutrones**



# 5. Reacciones en cadena

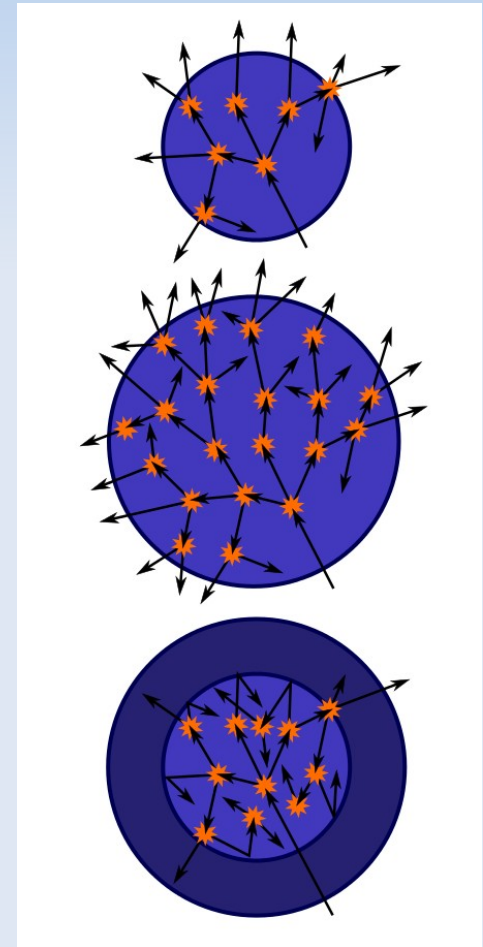
- ✓ Para mantener una reacción en cadena controlada uno (y sólo uno) de los neutrones emitidos por cada fisión ha de producir otra fisión
- ✓ Si el número de neutrones disminuye, la reacción en cadena se extingue
- ✓ Si el número de neutrones crece sin parar, la reacción se descontrola



# 5. Reacciones en cadena

$$k = \frac{\text{Población de neutrones en la generación } i+1}{\text{Población de neutrones en la generación } i}$$

- ✓ El factor multiplicador  $k$  da cuenta de la tasa de variación del número de neutrones
- ✓ Un sistema es **crítico** si  $k=1$
- ✓  $k$  depende de la geometría, del moderador, del material fisible, **la masa**, ...
- ✓ Una reacción en cadena se detiene (subcrítica) absorbiendo los neutrones



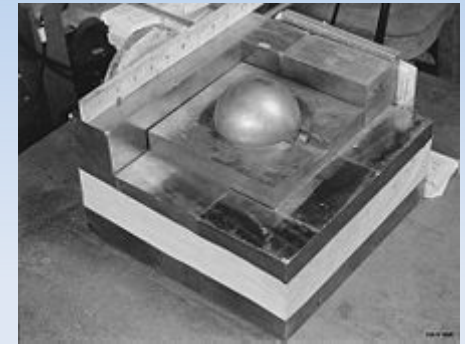
# 5. Reacciones en cadena

- ✓ Una vez diseñado un reactor, éste tiene un tamaño mínimo que hace  $k=1$
- ✓ La masa correspondiente se denomina **masa crítica**
- ✓ Se suele comparar la masa crítica de una esfera de material sin moderador

Isótopo	Masa Crítica
protactinio-231	750±180 kg
uranio-233	15 kg
uranio-235	52 kg
neptunio-236	7 kg
neptunio-237	60 kg
plutonio-238	9.04–10.07 kg
plutonio-239	10 kg
plutonio-240	40 kg
plutonio-242	100 kg
americio-241	55–77 kg
americio-242m	9–14 kg
americio-243	180–280 kg
curio-243	7.34–10 kg
curio-244	(13.5)–30 kg
curio-245	9.41–12.3 kg
curio-246	39–70.1 kg
curio-247	6.94–7.06 kg
californio-249	6 kg
californio-251	5 kg

# 5. Reacciones en cadena

- ✓ Un ejemplo de cómo se puede alcanzar criticidad es el “**Núcleo del Demonio**”, una esfera de 6 kg de plutonio (subcrítica) que utilizaron en Los Álamos en experimentos de criticidad y **reflectores neutrónicos**
- ✓ En 1945 un error de manipulación hizo que fuese crítico apilando bloques de carburo de tungsteno en torno a él
- ✓ En 1946 otro experimento utilizando semiesferas de berilio (separadas a pulso con un destornillador) causó que el núcleo fuera crítico
- ✓ En ambos casos, el núcleo fue crítico sólo unos instantes, pero causó la muerte de sendos científicos



# 5. Reacciones en cadena

- ✓ 2 maneras de hacer bombas atómicas (la teoría es fácil):
  - dos masas subcríticas de  $^{235}\text{U}$  altamente enriquecido se juntan súbitamente y el conjunto (~ 52 Kg) pasa a ser supercrítico
  - una esfera hueca de  $^{239}\text{Pu}$  (~ 10 kg) se comprime modificando su geometría

