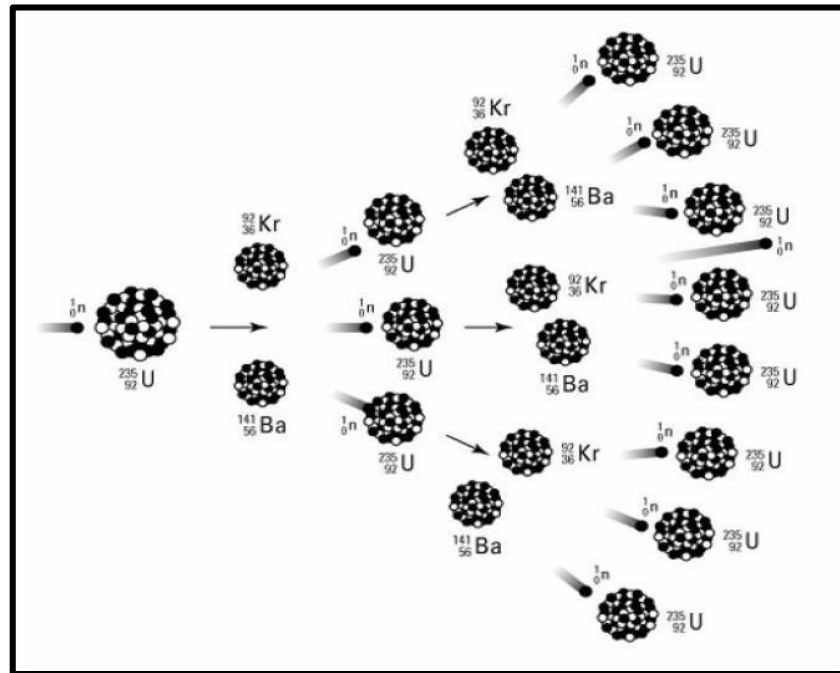


# UNIDAD DIDACTICA: FÍSICA NUCLEAR

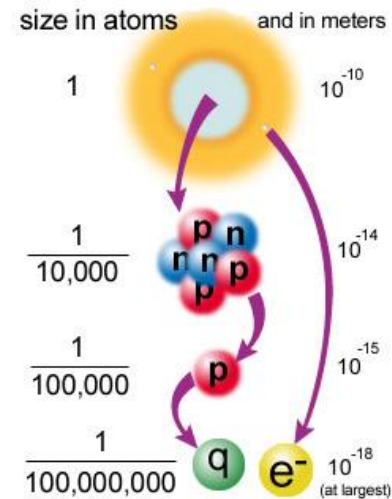
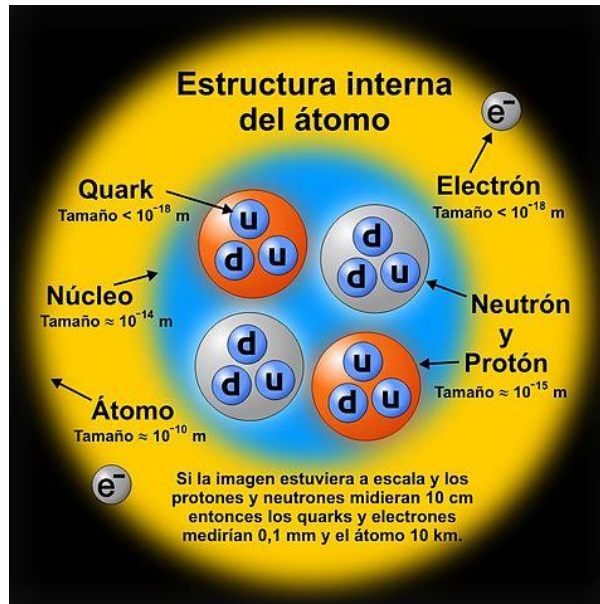
2º de Bachillerato



# EL NÚCLEO ATÓMICO

¿Qué dimensiones y características tiene un átomo?

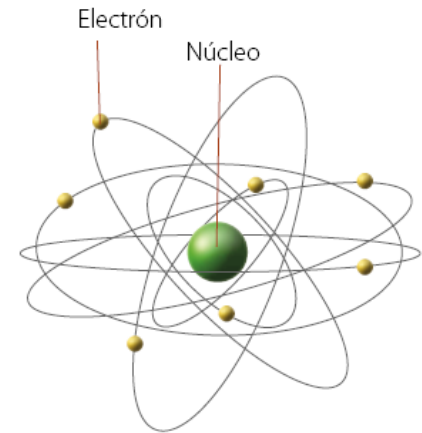
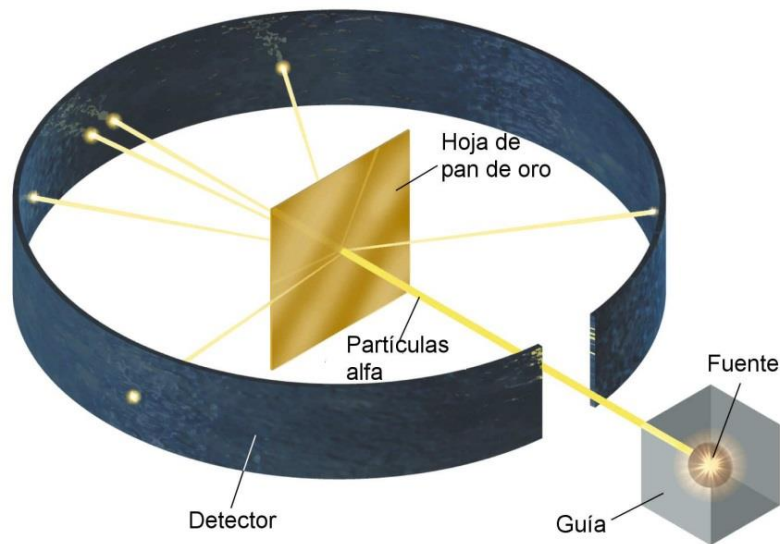
El átomo actual. Modelo estándar de partículas.



Toda la materia conocida esta formada por quarks, electrones y neutrinos que interactúan intercambiando bosones.

# EL NÚCLEO ATÓMICO

## MODELO de RUTHERFORD



- Casi todas las partículas  $\alpha$  atravesaban la lámina sin sufrir desviación.
- Solo unas pocas experimentaban pequeñas desviaciones.
- Aproximadamente una de cada 100.000 se reflejaba en la lámina.

# EL NÚCLEO ATÓMICO

¿Por qué se mantienen unidos los núcleos de los átomos?

Interacciones fundamentales:

Gravitatoria	Electromagnética
<p>Está causada por <b>la masa de los cuerpos</b>:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Siempre es atractiva</li><li>• Es una interacción débil, solo es apreciable cuando uno de los cuerpos tiene gran masa, como un planeta o un astro.</li></ul>	<p>Se produce entre <b>cuerpos con carga eléctrica</b>:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Puede ser atractiva o repulsiva</li><li>• Es de mayor intensidad que la gravitatoria y a distancias mayores de <math>10^{-15}</math> m puede superar a la nuclear fuerte.</li></ul>
Nuclear Débil	Nuclear Fuerte
<p>Es la responsable de la <b>desintegración <math>\beta</math> de algunos núcleos inestables</b>.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Es más débil que la nuclear fuerte y la electromagnética, pero a distancias nucleares supera a la gravitatoria.</li><li>• Es de corto alcance; prácticamente nula a distancias mayores de <math>10^{-17}</math> m.</li></ul>	<p>Es la responsable de la cohesión del núcleo: mantiene unidos a los nucleones.</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Es <b>una interacción muy intensa a distancias nucleares</b>, superior al resto de las interacciones.</li><li>• Es de corto alcance: prácticamente nula a distancias mayores de <math>10^{-15}</math> m.</li></ul>

# EL NÚCLEO ATÓMICO

**¿Por qué se mantienen unidos los núcleos de los átomos?**

## Fuerza Nuclear Fuerte

Las características fundamentales de esta interacción son:

- Fuerza atractiva para distancias  $< 10^{-15}\text{m}$ , prácticamente nula para distancias mayores.
- Afecta a nucleones.
- Muy corto alcance ( $\sim 10^{-15}\text{m}$ )
- La más fuerte de las interacciones de la naturaleza.
- Independiente de la carga.

# EL NÚCLEO ATÓMICO



**Número atómico (Z):** es el número de protones que tiene un átomo.

**Número másico (A):** coincide con el numero de nucleones (protones + neutrones). Indica la masa aproximada del núcleo.

## Tipos de núcleos: Núclidos

**Isótopos:**  $=Z$ ,  $\neq A$  ( $\neq N$ ). Son átomos del mismo elemento, con diferente masa.  
Ejemplo:  ${}^{12}_6C$ ,  ${}^{13}_6C$  y  ${}^{14}_6C$ .

**Isóbaros:**  $\neq Z$ ,  $=A$ . Átomos de elementos químicos diferentes. Ejemplo:  ${}^{16}_8O$  y  ${}^{16}_7N$

**Isótonos:**  $\neq Z$ ,  $=N$ . Átomos con mismo nº de neutrones. Ejemplo:  ${}^{57}_{26}Fe$  y  ${}^{58}_{27}Co$

# EL NÚCLEO ATÓMICO

## ¿Cómo se determina la energía de enlace?

**Defecto de masa:** La masa del núcleo es inferior a la masa de los protones y neutrones que lo forman.

$$E_{\text{enlace}} = \left( \sum m_{\text{nucleones}} - m_{\text{núcleo}} \right) \cdot c^2$$

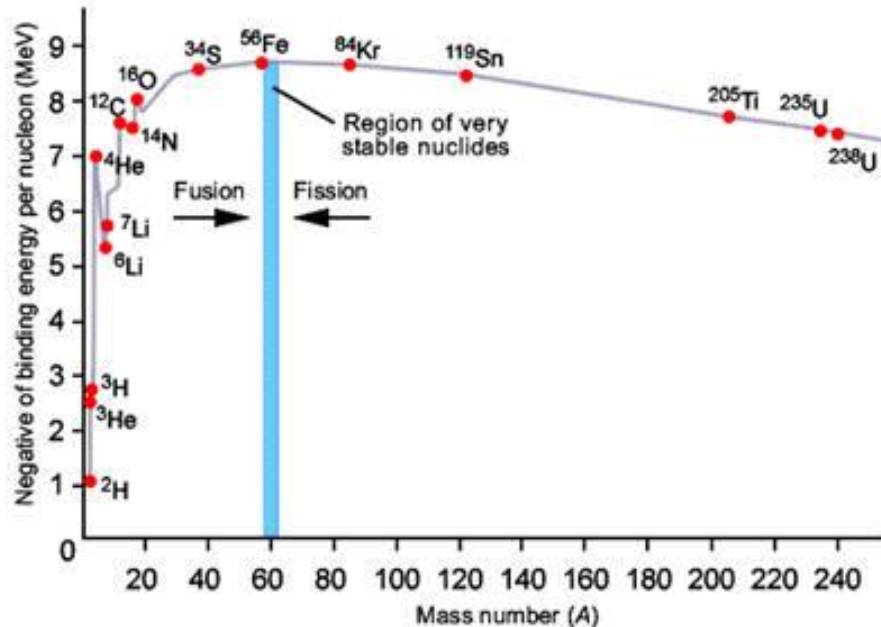
**Energía de enlace por nucleón (En):**

$$E_n = \frac{\Delta E_{\text{enlace}}}{A}$$

Nota: **Unidad de masa atómica (u)** se define como la doceava parte de la masa del átomo de carbono.

# EL NÚCLEO ATÓMICO

¿Cómo de estables son los núcleos?



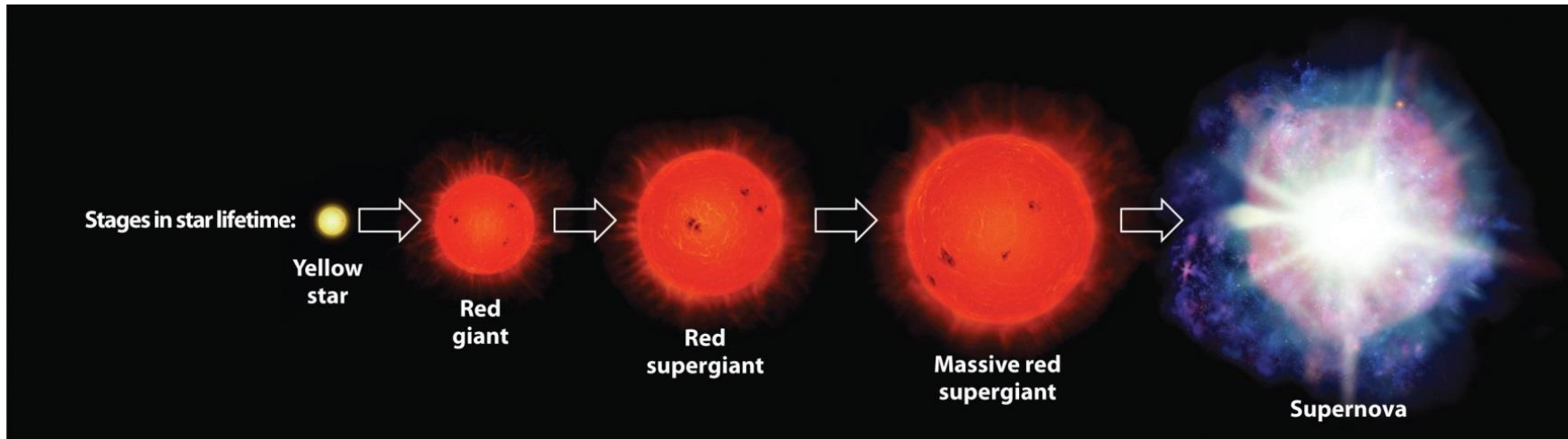
Gráfica: Energía de enlace por nucleón en función del número de nucleones del núcleo

Las mayores energías de enlace por nucleón se presentan para números másicos comprendidos entre 40 y 100 aproximadamente.



# EL NÚCLEO ATÓMICO

## Reacciones de fusión nuclear



<b>Core Temperature:</b>	$1.5 \times 10^7$ K	$2 \times 10^8$ K	$7 \times 10^8$ K	$3 \times 10^9$ K	$1 \times 10^{11}$ K
<b>Primary Nuclear Reaction:</b>	$^1\text{H}$ fusion	$^4\text{He}$ fusion	$^4\text{He} + ^{12}\text{C}$ $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$	Proton–neutron exchange reactions	Multiple neutron captures
<b>Elements Formed:</b>	He	C, O, Ne, Mg	Na, Si, S, Ar, Ca	Fe, Ni	Elements with $Z > 28$

# EL NÚCLEO ATÓMICO

## Problemas

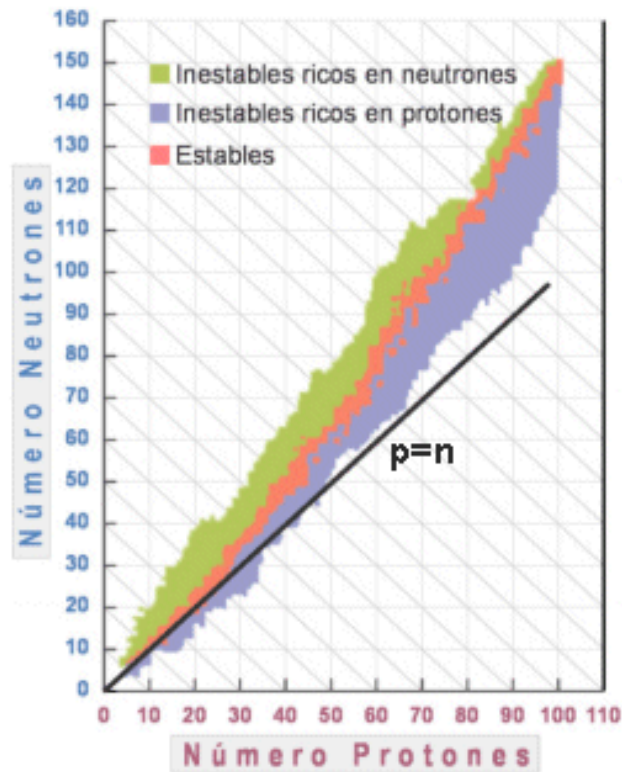
- 1 Considera els nuclis de carboni  $^{12}\text{C}$  i  $^{13}\text{C}$  de masses 12,0000 u i 13,0034 u, respectivament. El nombre atòmic d'aquests dos isòtops és 6. Calcula per a tots dos nuclis:
- a) El defecte de massa en quilograms i en unitats de massa atòmica.
  - b) L'energia d'enllaç.
  - c) L'energia d'enllaç per nucleó.
- Dades:  $1\text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$ ;  $1\text{ u} = 931\text{ MeV}$ ;  
 $1\text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ J}$ ,  $m(\text{p}) = 1,0073\text{ u}$ ;  $m(\text{n}) = 1,0087\text{ u}$ ;  
 $c = 3 \cdot 10^8\text{ m/s}$ .

2.- Calcula en MeV la energia que equivale a 1u.

# LA RADIOACTIVIDAD

## ¿Qué es la radioactividad?

### Desintegración radioactiva

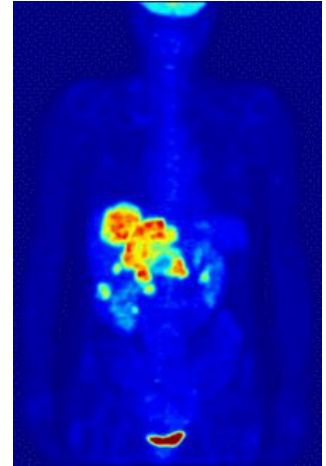


La relación: neutrones/protones es mayor en núcleos pesados

Los núcleos inestables se transforman en otros emitiendo radiaciones.

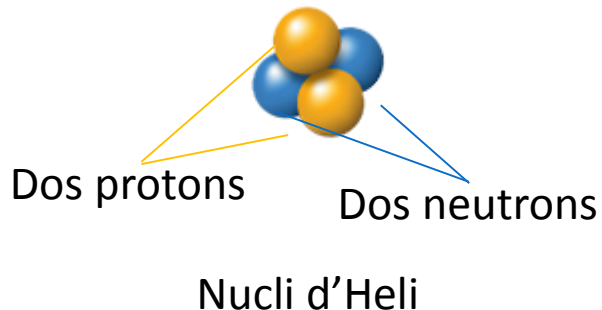
# La Radioactivitat

- La radiació en medicina
  - per a diagnosi (visualització de danys)
    - Positron emission tomography (PET)
  - per a tractament
    - La radioteràpia




- Tres tipus de radiació:

Partícula alfa  $\alpha$

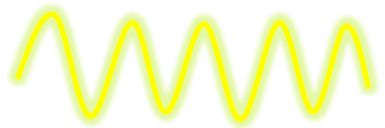


Partícula beta  $\beta$



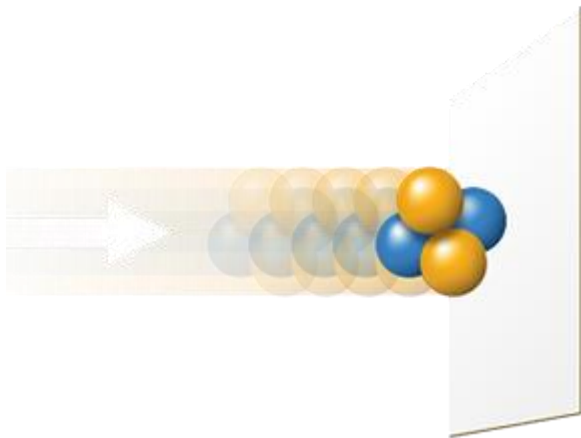
Idèntic a un  
electró però a  
alta energia

Radiació gamma  $\gamma$



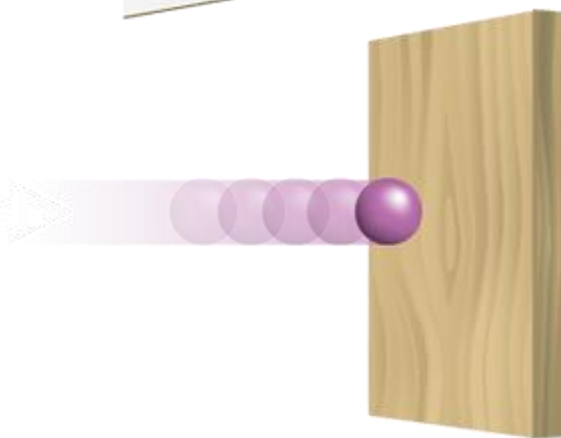
Radiació electromagnètica

$\alpha$



No pot travessar:  
Full de paper, la pell...

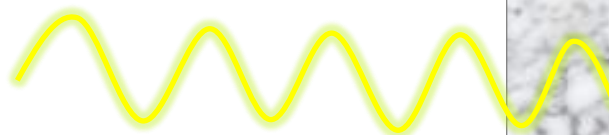
$\beta$



Travessa la pell humana

No pot travessar:  
Fusta, alumini...

$\gamma$



No pot travessar:  
Formigó gruixut

Neutró



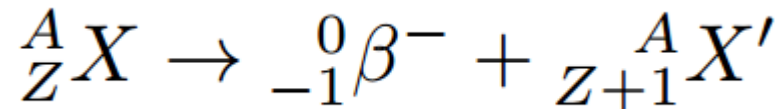
# Lleis de Soddy-Fajans

Mecanismes de desintegració: radioactivitat natural

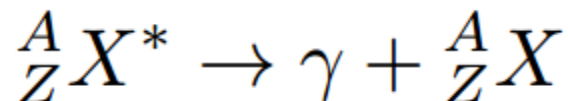
I. Desintegració  $\alpha$  



II. Desintegració  $\beta^-$  



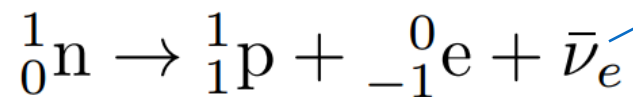
III. Emissió de radiació  $\gamma$  



# La desintegració $\beta^-$ i $\beta^+$



$\beta^-$  : Conversió d'un neutró en un protó



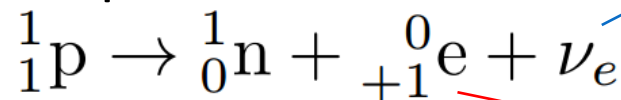
Antineutrí electrònic

Electró

Exemple:



$\beta^+$  : Conversió d'un protó en un neutró



Neutrí electrònic

Positró

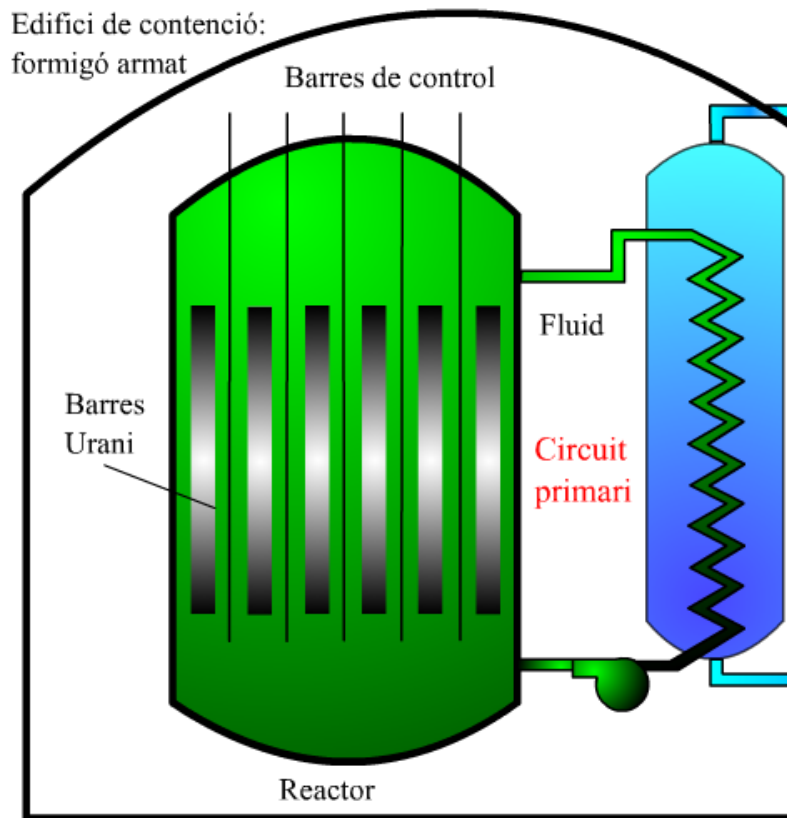
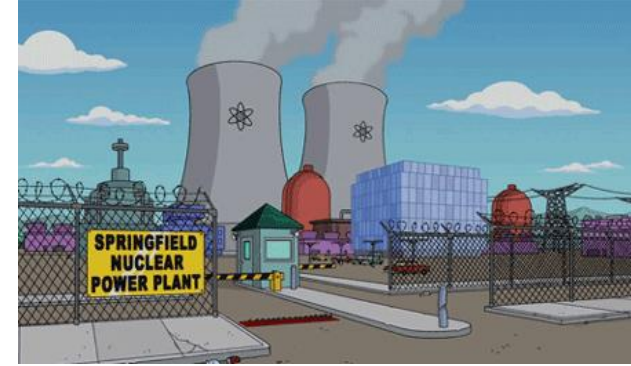
Exemple:



# La central nuclear

## Radioactivitat artificial:

s'utilitzen partícules per a **bombardejar** els nuclis i provocar reaccions nuclears.

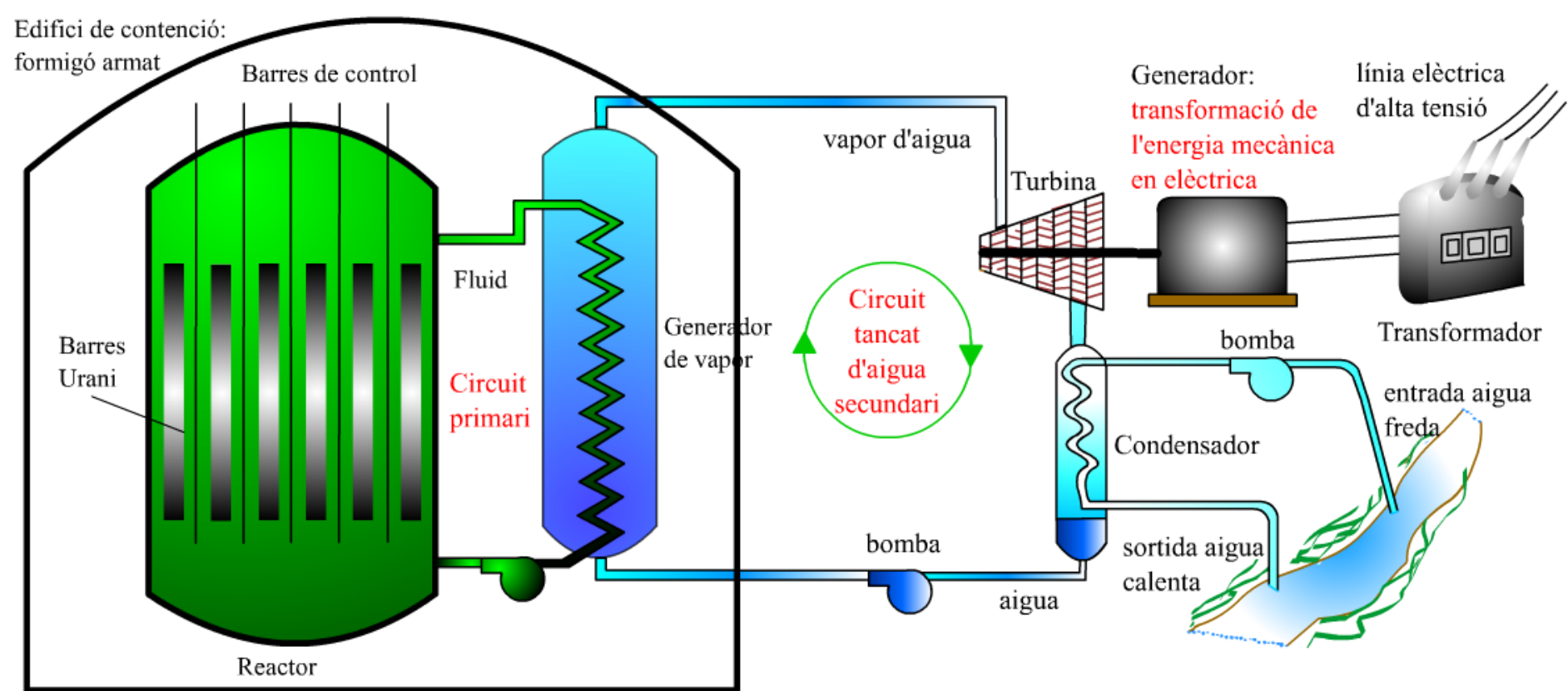


- El combustible: barres d'urani  
Es bombardeja amb neutrons
- Barres de control: cadmi o bor  
Es mouen i absorbeixen neutrons
- El moderador: aigua o grafit  
Frena la velocitat dels neutrons
- El fluït refrigerant  
Extreu la calor
- Blindatge: formigó armat  
Evita la fuga de radiacions i de neutrons



# La central nuclear

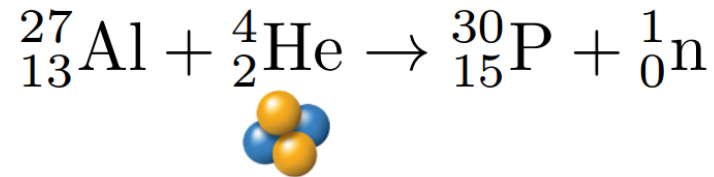
Aprofitar la calor produïda en la reacció nuclear per a transformar-la en energia mecànica i després en elèctrica



# Radioactivitat artificial

Curie va descobrir la radioactivitat artificial:

- Bombardeig amb nuclis d'heli:



Les partícules projectils: protons, neutrons, electrons, part. alfa...

${}_{+1}^0p$



${}_0^1n$



$e^{-}$



${}_2^4\text{He}$



# I tot això, quant tarda?

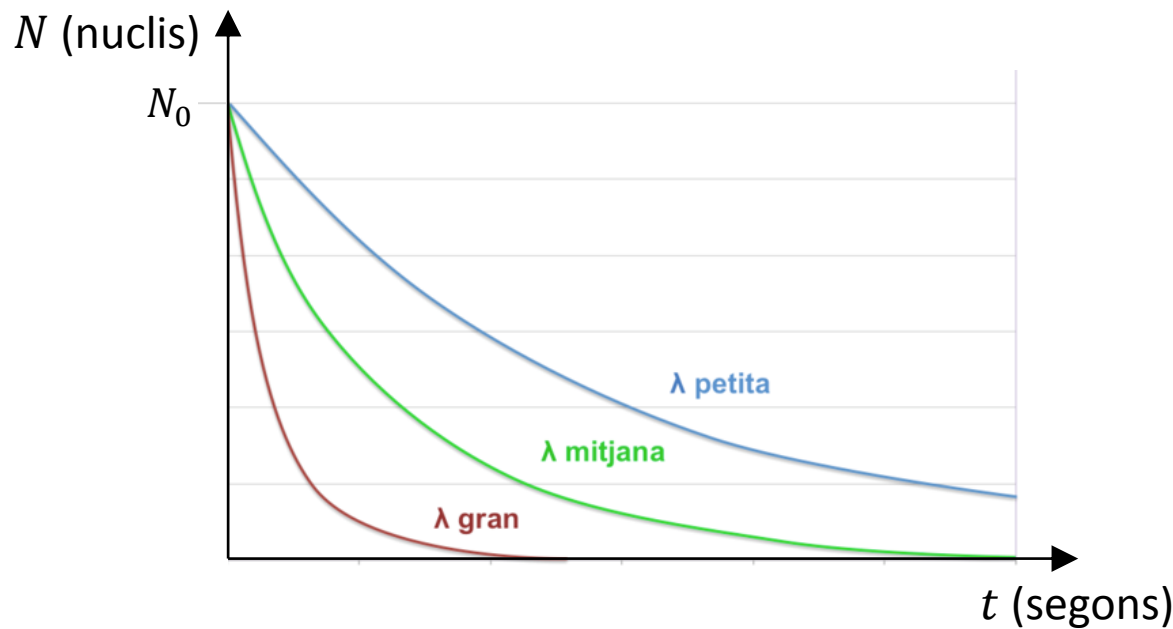
- Evolució exponencial del nombre de nuclis ( $N$ ):

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

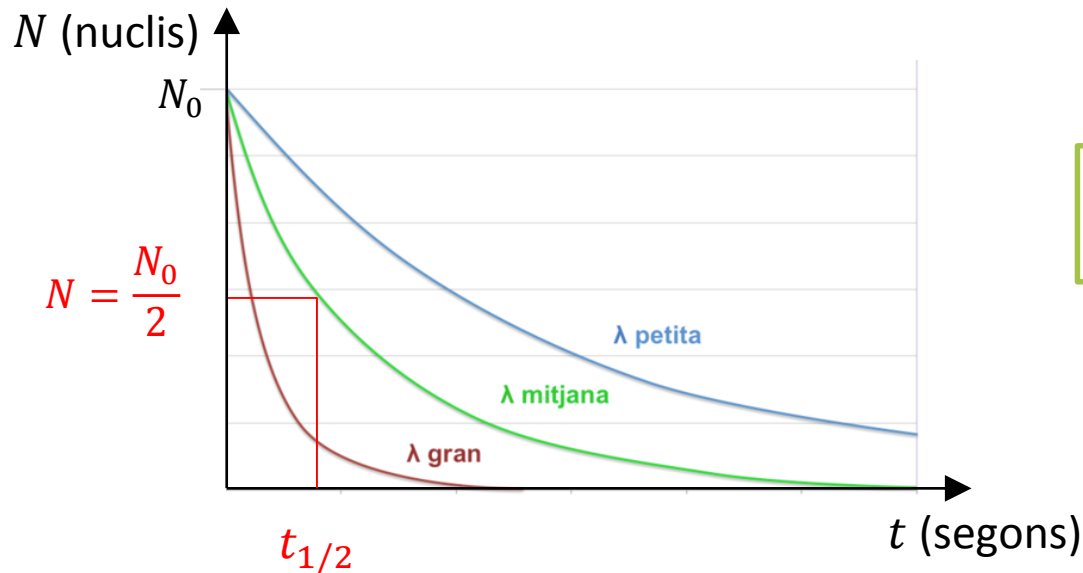
$N_0$ : nuclis inicials

$\lambda$ : constant de desintegració ( $s^{-1}$ )

El nombre de nuclis que queden per desintegrar decreix exponencialment amb el temps.



# I tot això, quant tarda?



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

- Període de semidesintegració ( $t_{1/2}$ ): quan  $N = \frac{N_0}{2}$

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \quad \rightarrow \quad t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

demo. pàg 283

- Vida mitjana

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

$t_{1/2}$  i  $\tau$  són indicadors d'estabilitat

**Atenció:**  $\tau > t_{1/2}$

# Cinètica de la radioactivitat

- Activitat radioactiva

Nombre de nuclis desintegrats per unitat de temps

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

$$A = -\frac{dN}{dt} \quad \rightarrow \quad \boxed{A = \lambda N}$$

Ens informa de la “velocitat” de desintegració

Es mesura en Becquerels

$$1 \text{ Becquerel} = 1 \text{ Bq} = \frac{1 \text{ desintegració}}{1 \text{ segon}}$$

L'activitat inicial d'una mostra és:

$$A_0 = \lambda N_0$$

# Cinètica de la radioactivitat

- 7 El període de semidesintegració del radó-222 és de 3,9 dies; si inicialment es disposa de 20 micrograms de radó-222, quant en queda després de 7,6 dies?

Ja hem trobat que:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \rightarrow \lambda = 0,178 \text{ dies}^{-1}$$

$$\text{Massa: } m_0 = 20 \mu\text{g} \rightarrow m = 5,181 \mu\text{g}$$

De nuclis a mols: Nombre d'Avogadro

$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ nuclis/mol}$$

De mols a grams: massa molar

$$\text{Radó: } 222 \text{ g/mol}$$

L'activitat:

Inicial:  $A_0 = \lambda N_0$

$$\lambda = 0,178 \frac{1}{\text{dies}} \frac{1 \text{ dia}}{24 \text{ h}} \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 2,057 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

$$N_0 = 20 \mu\text{g} \frac{1 \text{ g}}{10^6 \mu\text{g}} \frac{1 \text{ mol}}{222 \text{ g}} \frac{6,022 \cdot 10^{23} \text{ nuclis}}{1 \text{ mol}} = 5,425 \cdot 10^{16} \text{ nuclis}$$

$$A_0 = \lambda N_0 = 2,057 \cdot 10^{-6} \cdot 5,425 \cdot 10^{16} = 1,116 \cdot 10^{11} \text{ Bq}$$

# Cinètica de la radioactivitat

- 7 El període de semidesintegració del radó-222 és de 3,9 dies; si inicialment es disposa de 20 micrograms de radó-222, quant en queda després de 7,6 dies?

Ja hem trobat que:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \rightarrow \lambda = 0,178 \text{ dies}^{-1}$$

$$\text{Massa: } m_0 = 20 \mu\text{g} \rightarrow m = 5,181 \mu\text{g}$$

L'activitat:

Final:  $A = \lambda N$

$$N =$$

$$A =$$

De nuclis a mols: Nombre d'Avogadro

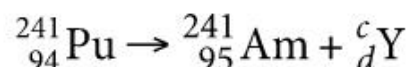
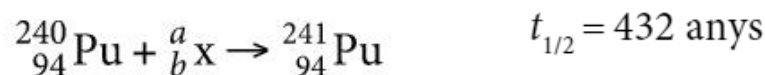
$$N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ nuclis/mol}$$

De mols a grams: massa molar

$$\text{Radó: } 222 \text{ g/mol}$$

Solució:  $N = 1,405 \cdot 10^{16} \text{ nuclis}$  i  $A = 2,871 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$

**P4)** L'americi (Am) és l'element de nombre atòmic 95. Els primers àtoms d'americi 241 van ser produïts el 1944 per Glenn Theodore Seaborg i els seus col·laboradors fent servir un seguit de reaccions nuclears a partir del plutoni (Pu). A continuació, es mostren, incompletes, les dues últimes etapes del procés:



**a)** Determineu els valors dels coeficients  $a$ ,  $b$ ,  $c$  i  $d$ . Quin nom té la partícula que el Pu-240 ha capturat en la primera reacció? Com s'anomena la desintegració descrita en la segona reacció?

**b)** Calculeu el percentatge de nuclis de Am-241 que s'han desintegrat des del 1944 fins el 2013.



*Glenn Theodore Seaborg*

**P5)** El període de semidesintegració de l'isòtop  ${}^{235}\text{U}$  és de  $7,00 \times 10^8$  anys. Per a una mostra d'1,000 g, calculeu:

**a)** L'activitat inicial en becquerels (Bq).

**b)** La massa de  ${}^{235}\text{U}$  quan hagin passat  $10^8$  anys.

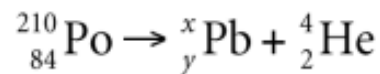
DADES: Nombre d'Avogadro,  $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ nuclis} \cdot \text{mol}^{-1}$

$1 \text{ Bq} = 1 \text{ desintegració} \cdot \text{s}^{-1}$

Massa molar de  ${}^{235}\text{U}$ ,  $M = 235 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$



**P5)** El poloni 210 té un període de semidesintegració de 138,4 dies i es desintegra, per emissió de partícules alfa, en un isòtop estable del plom. El procés és el següent:



- a)** Determineu els índexs  $x$  i  $y$  i el temps necessari perquè la massa del poloni es redueixi al 30 % de la massa inicial.
- b)** Calculeu l'energia que es desprèn en la desintegració d'un nucli de poloni, expressada en J i en MeV.

DADES:  $m({}_{84}^{210}\text{Po}) = 209,983 \text{ u};$

$$m({}_y^x\text{Pb}) = 205,974 \text{ u};$$

$$m({}_2^4\text{He}) = 4,003 \text{ u};$$

$$1 \text{ u} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg};$$

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J};$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}.$$

**Atenció!** Aïllar el temps!

- P4)** La radioactivitat és un mitjà fiable per a calcular l'edat de les roques i minerals que contenen isòtops radioactius concrets. Aquest sistema de datació radiomètrica ens permet mesurar el temps geològic.

Un d'aquests mètodes es basa en la desintegració de l'isòtop  $^{40}_{19}\text{K}$  (potassi) en  $^{40}_{18}\text{Ar}$  (argó). El rellotge potassi-argó comença a funcionar quan els minerals que contenen potassi cristallitzen a partir d'un magma o dins una roca. En aquest moment, els nous minerals contenen  $^{40}_{19}\text{K}$  i no contenen  $^{40}_{18}\text{Ar}$ . A mesura que passa el temps, el  $^{40}_{19}\text{K}$  es desintegra i tots els àtoms de  $^{40}_{18}\text{Ar}$  que trobem en el mineral en un temps posterior a la formació provenen de la descomposició del  $^{40}_{19}\text{K}$ .

- a)** Escriviu la reacció nuclear de l'emissió de partícules  $\beta$  de l'isòtop  $^{40}_{19}\text{K}$ .
- b)** En una roca s'han trobat 10,0 g de  $^{40}_{19}\text{K}$  i 10,0 g de  $^{40}_{18}\text{Ar}$ . Quina quantitat de  $^{40}_{19}\text{K}$  hi haurà quan hauran transcorregut  $5,00 \times 10^9$  anys? Fent servir la datació radiomètrica basada en el potassi-argó, digueu quina edat té la roca. Considereu que el  $^{40}_{19}\text{K}$  es desintegra només en  $^{40}_{18}\text{Ar}$ .

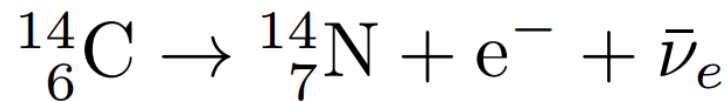
**DADA:** Període de semidesintegració del  $^{40}_{19}\text{K}$ ,  $t_{1/2} = 1,25 \times 10^9$  anys

# Radioactivitat natural



## Carboni 14 i la datació

- Isòtop del carboni, inestable i radioactiu
- Desintegració  $\beta^-$  espontània



- $t_{1/2} = 5730$  anys

## Urani-plom

- Per a mostres a partir de 1 milió d'anys

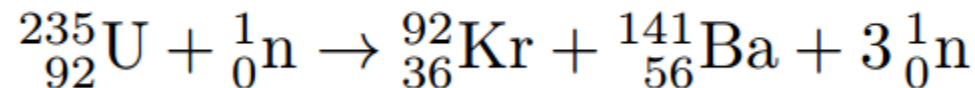
**Activitat del PhET** de simulació de datació radioactiva.

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/radioactive-dating-game>

# La central nuclear

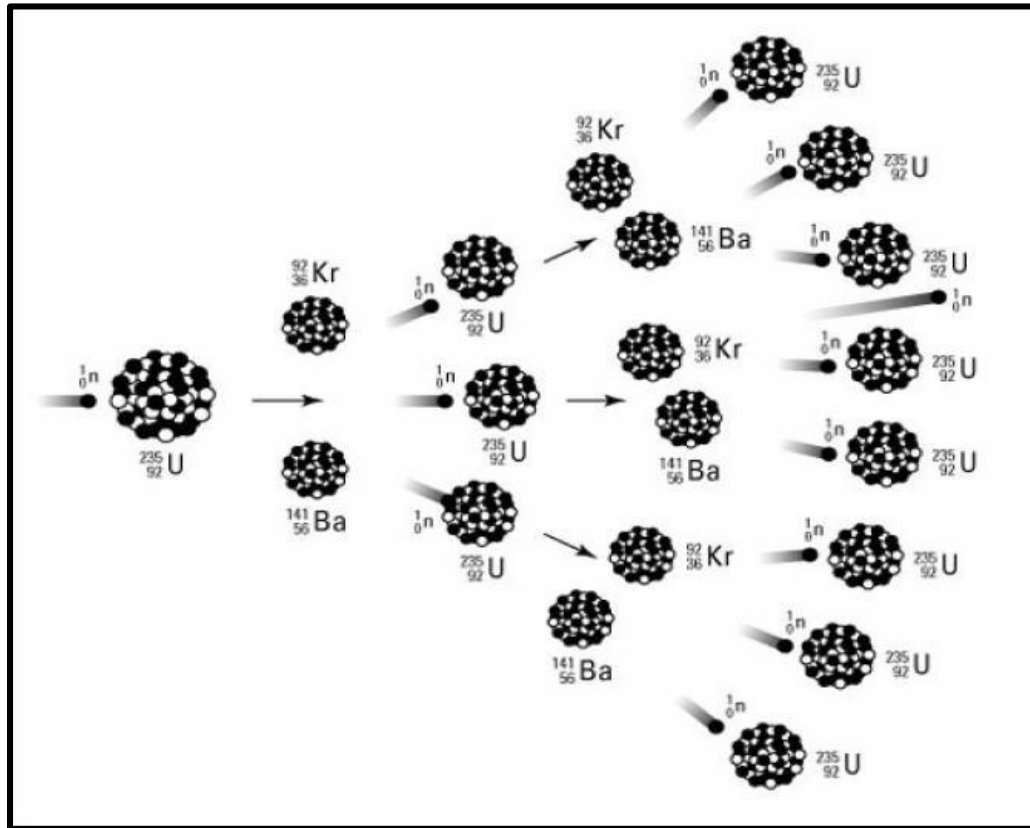
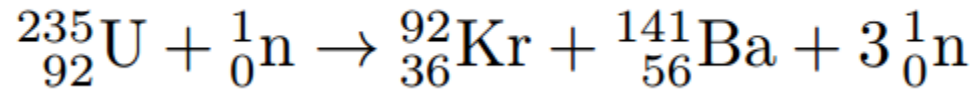


- ¿Que es un proceso de **fisión nuclear**?
  - Es una reacción nuclear en la que un núcleo pesado se divide en otros dos más ligeros habitualmente al ser bombardeado con neutrones. El núcleo de gran masa absorbe el neutrón y se rompe en dos fracciones mas pequeñas. En el proceso se liberan más neutrones y gran cantidad de energía.



<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/nuclear-fission>

# Fisión nuclear



# Reacciones nucleares

- En las **reacciones nucleares** intervienen directamente los núcleos de los átomos transformándose en otros distintos.

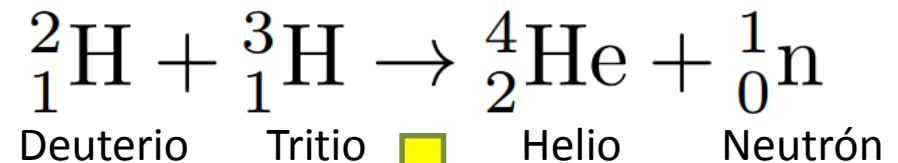
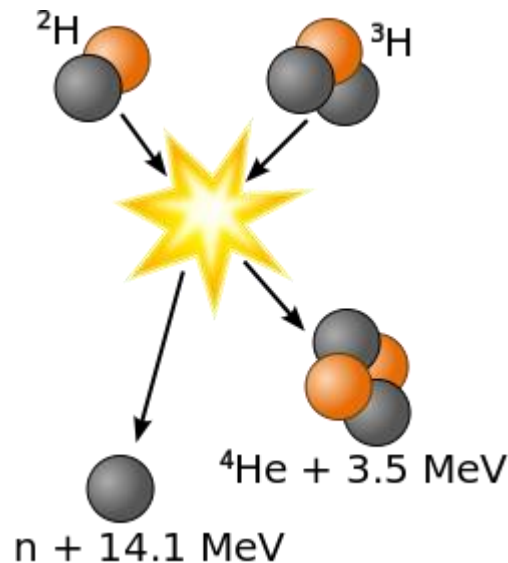
En **toda reacción nuclear** se conserva:

- **La carga eléctrica:** la carga de las partículas que reaccionan ha de ser igual a la suma de las cargas de todas las partículas que se obtienen.
- **El número de nucleones:** (protones + neutrones).
- **La cantidad de movimiento:** permite conocer la trayectoria de las partículas que intervienen.
- **El conjunto masa-energía:** la diferencia entre las masa de reactivos y productos se transforma en energía según el principio de equivalencia masa-energía:  $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$

# El Sol y las estrellas

- Fusión
  - Los núcleos se unen para formar uno mayor

La reacción de fusión mas sencilla:  
Isótopos del hidrogeno




Se libera mucha energía!

El deuterio y el Tritio son positivos:  
para hacer que se fusionen se necesitan  
temperaturas muy altas en el reactor.  
Se usa el confinamiento magnético para  
que las partículas no toquen las paredes!



# El Sol y las estrellas

Stages in star lifetime:

  
Yellow  
star

  
Red  
giant

  
Red  
supergiant

  
Massive red  
supergiant

  
Supernova

<b>Core Temperature:</b>	$1.5 \times 10^7$ K	$2 \times 10^8$ K	$7 \times 10^8$ K	$3 \times 10^9$ K	$1 \times 10^{11}$ K
<b>Primary Nuclear Reaction:</b>	$^1\text{H}$ fusion	$^4\text{He}$ fusion	$^4\text{He} + ^{12}\text{C}$ $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ $^{12}\text{C} + ^{16}\text{O}$	Proton–neutron exchange reactions	Multiple neutron captures
<b>Elements Formed:</b>	He	C, O, Ne, Mg	Na, Si, S, Ar, Ca	Fe, Ni	Elements with $Z > 28$



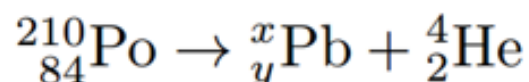
# ¿Cómo se calcula la energía que se libera?

- Tanto en un proceso de fisión como de fusión nuclear, se libera energía, que se debe a una pérdida de masa experimentada durante el proceso. Se calcula por la ecuación:  $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$

Pérdida de masa: (masa inicial – masa final)

Ejemplo resuelto de la pág. 290.

2. El poloni 210 té un període de semidesintegració de 138,4 dies i es desintegra, per emissió de partícules alfa, en un isòtop estable del plom. El procés és el següent:



- a) Determineu els índexs  $x$  i  $y$  i el temps necessari perquè la massa del poloni es redueixi al 30 % de la massa inicial.
- b) Calculeu l'energia que es desprèn en la desintegració d'un nucli de poloni, expressada en J i en MeV.

DADES:  $m({}_{84}^{210}\text{Po}) = 209,983 \text{ u}$ ;

$$m({}_y^x\text{Pb}) = 205,974 \text{ u}; \quad m({}_2^4\text{He}) = 4,003 \text{ u}$$

$$1 \text{ u} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}; \quad 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}; \quad c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$