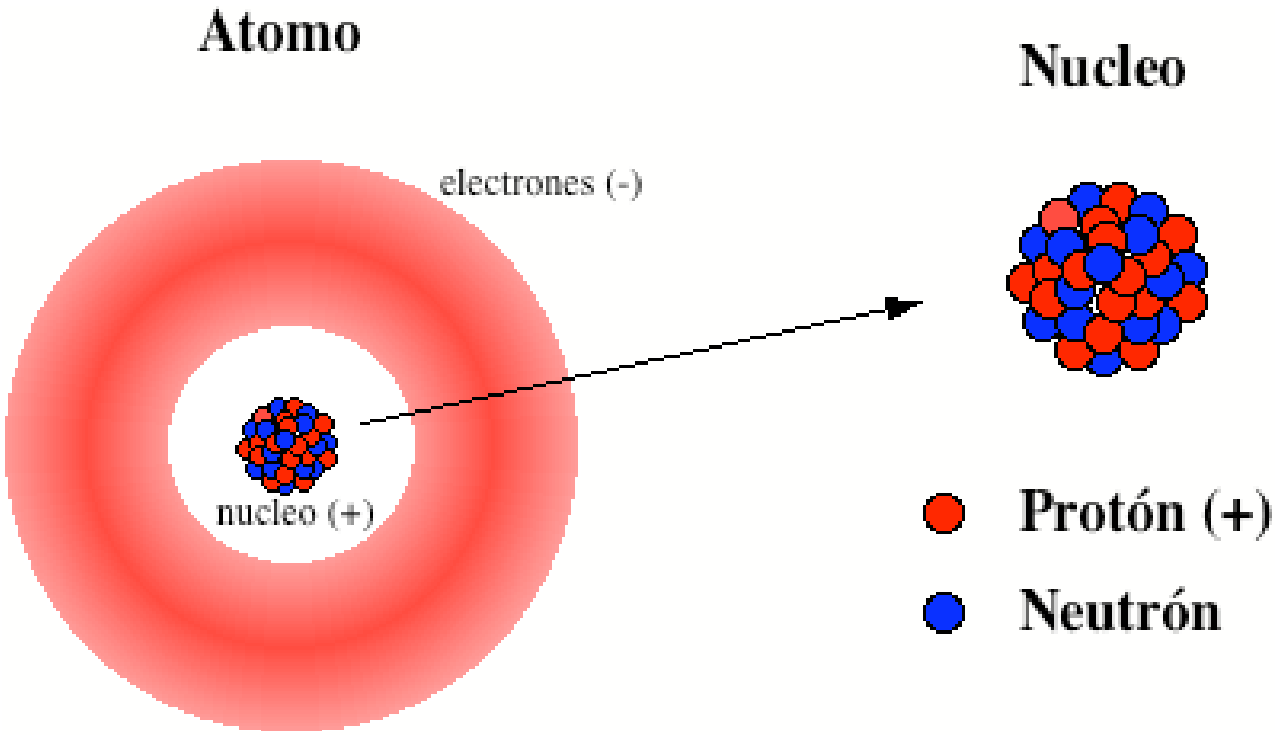
# Física y Tecnología Energética

## 12 - Energía Nuclear de Fisión. Reactores.

# Núcleos e Isótopos

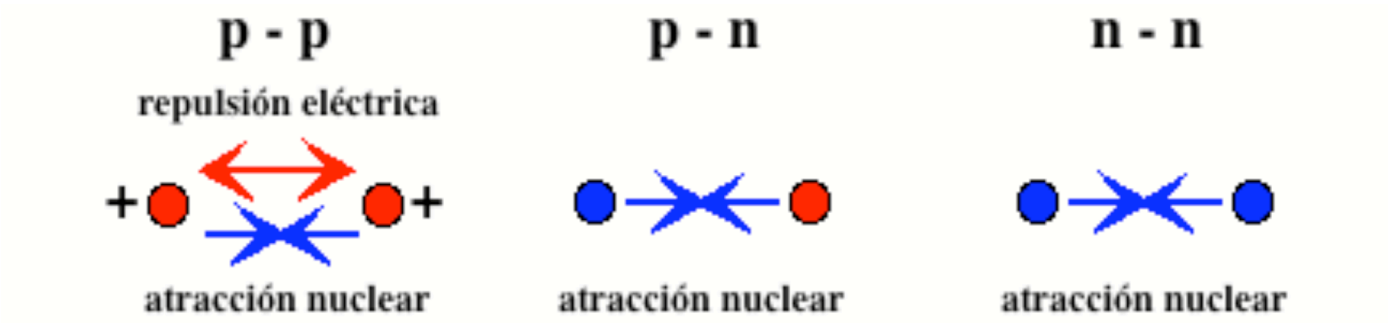



**Nucleo** { **Z Protones**, **N Neutrones** } → **A = N + Z Nucleones**

**Z** — *Nombre, propiedades químicas*

**N, A** — *Isótopo, masa*

# Estabilidad nuclear

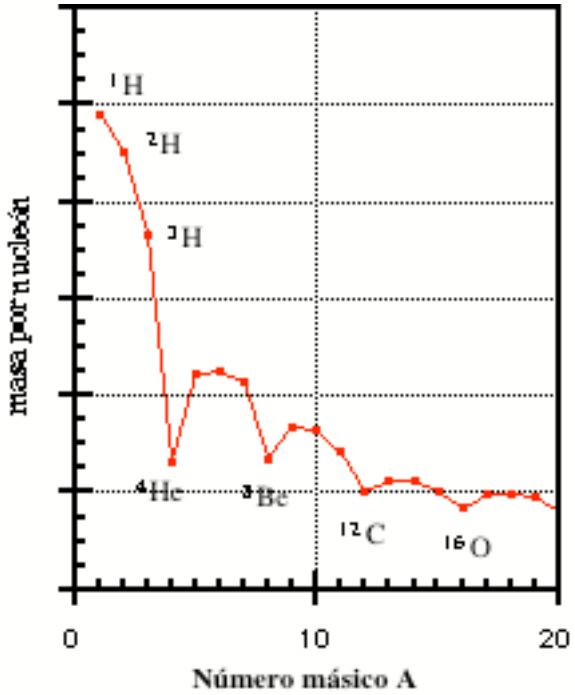


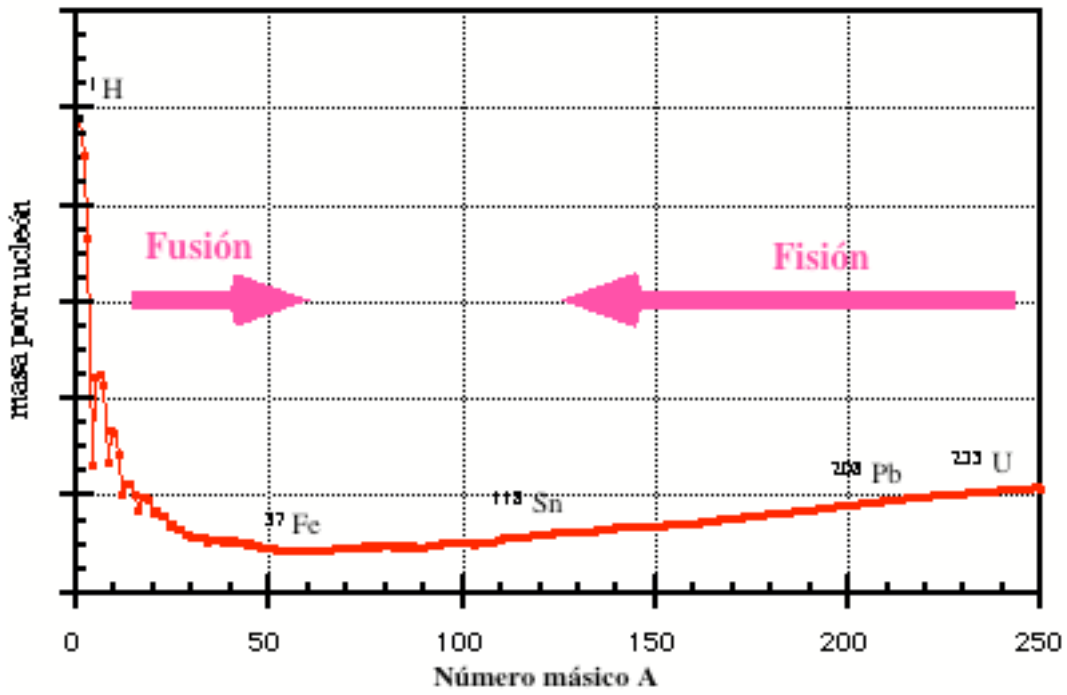

atracción nuclear *¿ se compensan ?* repulsión eléctrica

**núcleos estables e inestables**

# Masas nucleares y energía

$$\text{masa por nucleón} = \frac{\text{masa}}{A}$$




**Fusión de nucleos pequeños**

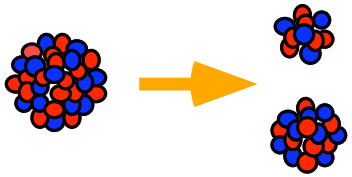
**Fisión de nucleos grandes**

→ *Disminución de masa* →

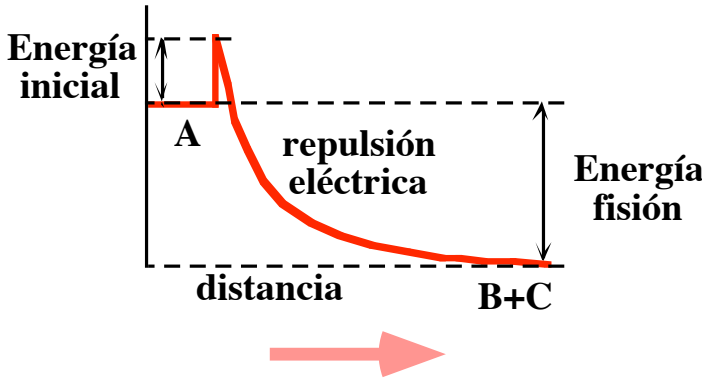
**Energía**

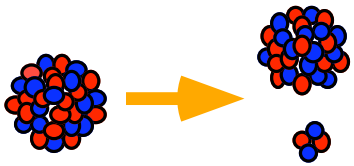
$$E = mc^2$$

# Reacciones nucleares y radiactividad



**Fisión A → B+C**

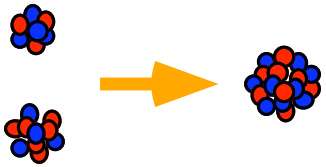


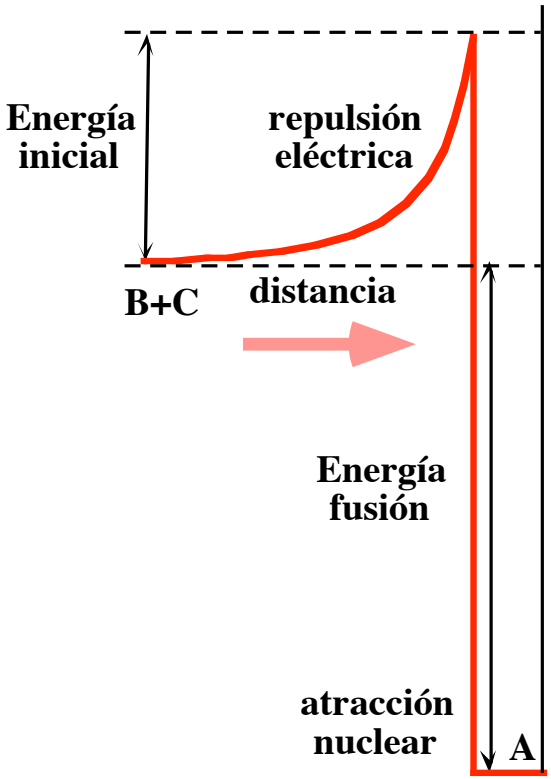
**Emisión radiactiva α**

Probabilidad de emisión espontánea por efecto túnel

$\tau = 1\ s - 10\ 000$ años

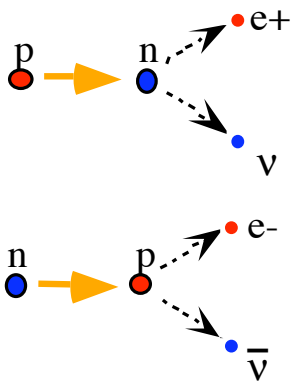


**Fusión B+C → A**



# Otras emisiones radiactivas

**Desintegración β**

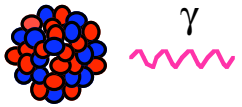



Provocada por la interacción "débil"

Probabilidad de emisión espontánea
si es energéticamente favorable

$\tau = 1$ ms $- 10$ horas

**Emisión γ**




Recolocación de nucleones
en estado excitado

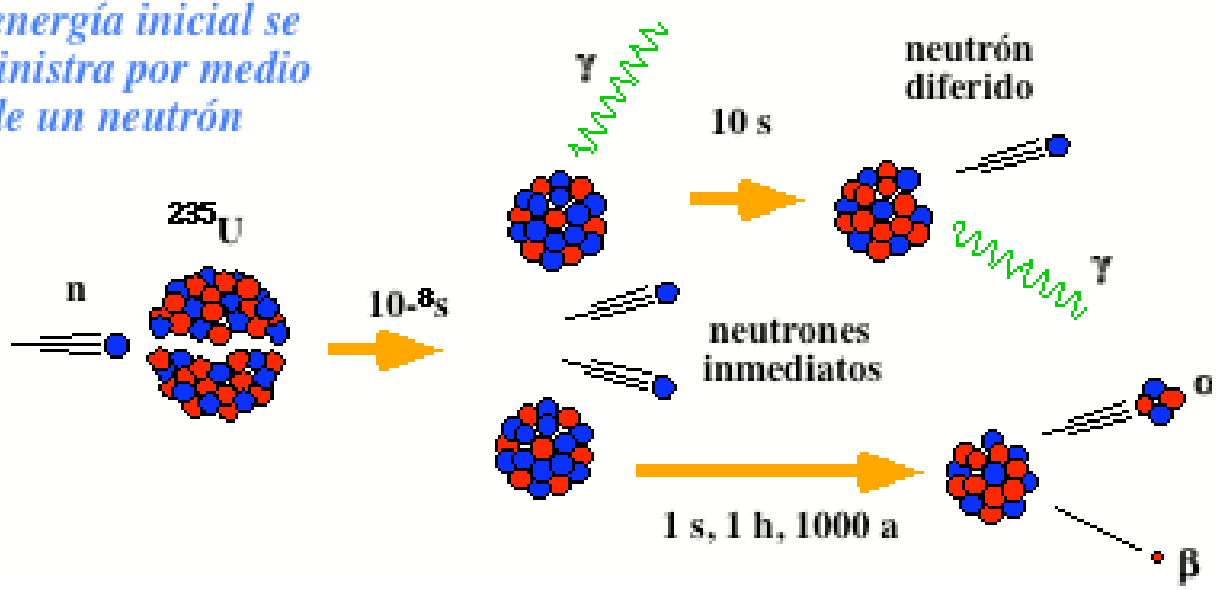
Probabilidad de emisión espontánea

$\tau = 1$ ns

**Frecuentemente acompaña**
**a los demás procesos**

# La reacción de Fisión del Uranio

*La energía inicial se suministra por medio de un neutrón*




1 eV =
= 1.6 x $10^{-19}$ J =
= 3.8 x $10^{-20}$ cal

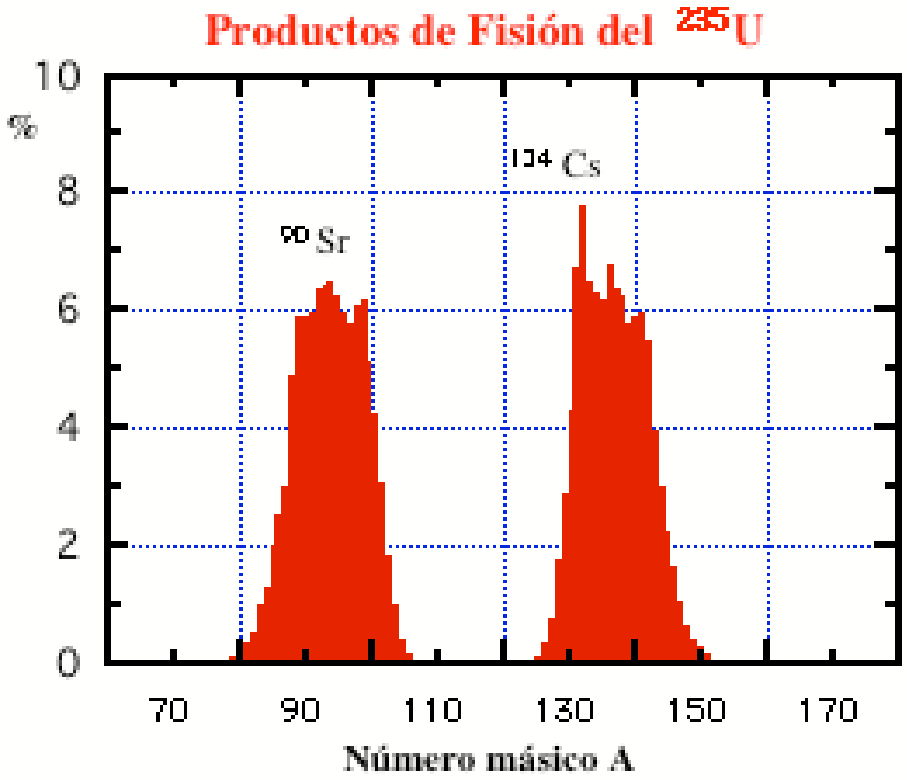
***3 x $10^{10}$ Fisiones por s de $^{235}$U = 1 Watio***

***Fisión 1 gr $^{235}$U = = Combustión 3 Tm C***

## Energía liberada en la fisión

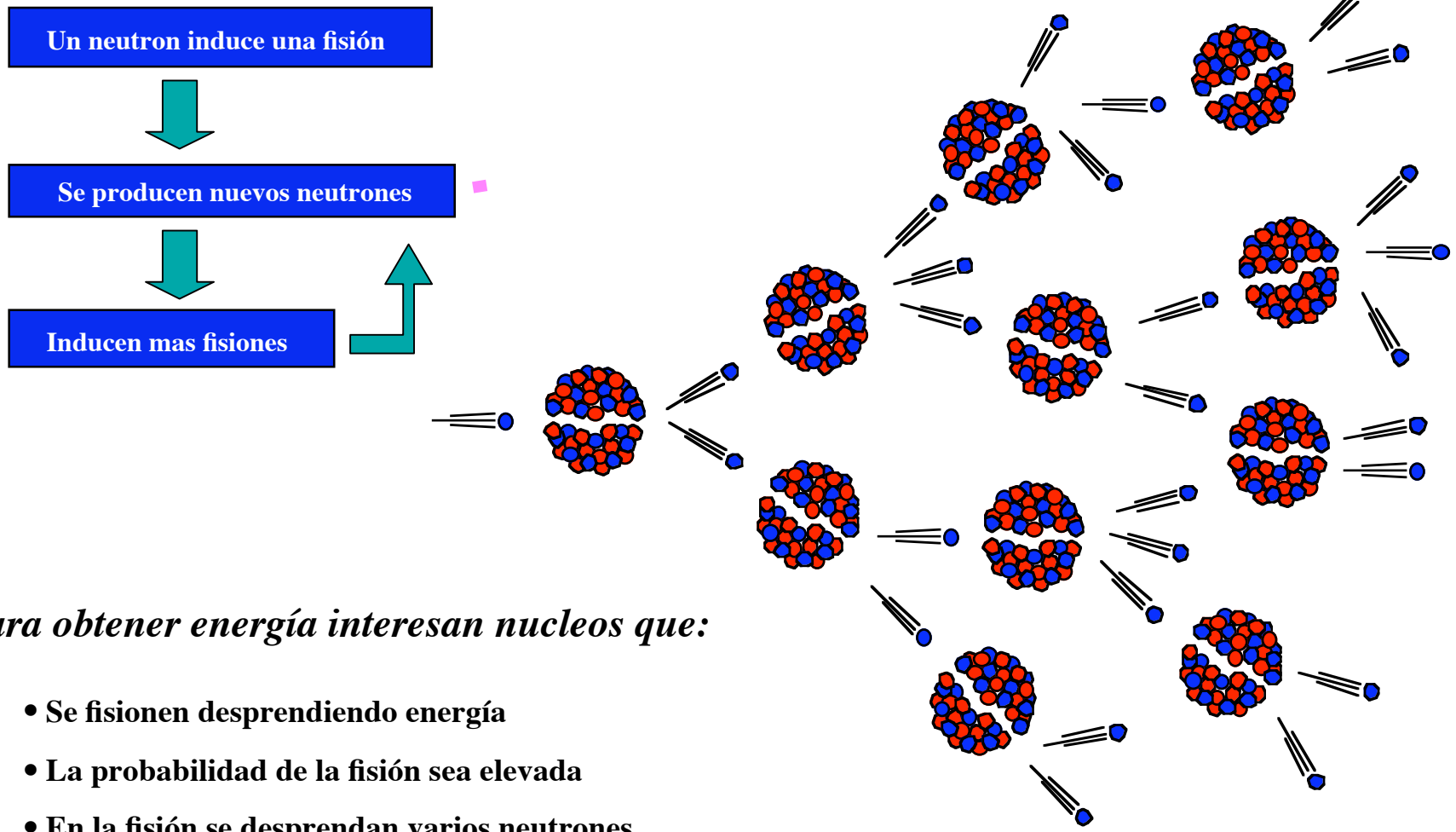
| | |
|---|---|
| **Productos de fisión** | **166 MeV** |
| **Neutrones ( E. Cinética )** | **5 MeV** |
| **Rayos gamma** | **8 MeV** |
| **Radiactividad posterior ( beta, gamma, neutrinos )** | **27 Mev** |
| | **206 Mev** |

# La reacción de Fisión del Uranio




*Los dos nucleos en que se divide el $^{235}U$ son en general radiactivos*

# La reacción en cadena



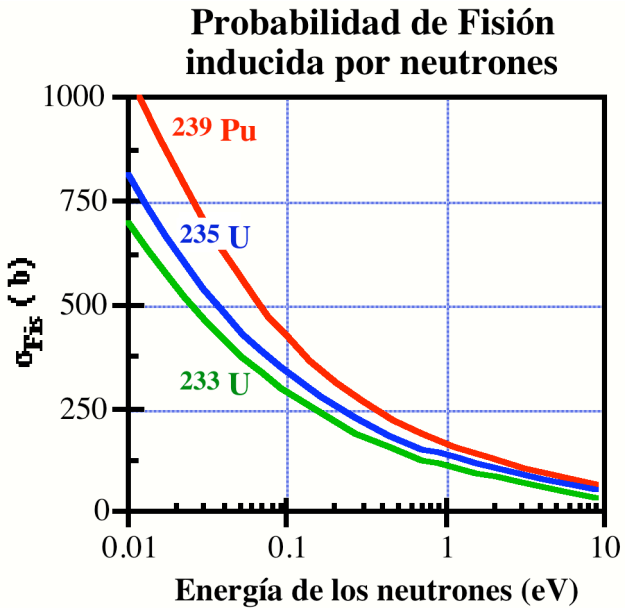

***Para obtener energía interesan nucleos que:***

- **Se fisionen desprendiendo energía**
- **La probabilidad de la fisión sea elevada**
- **En la fisión se desprendan varios neutrones que puedan generar una reacción en cadena**

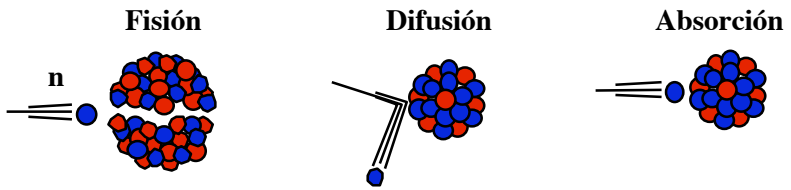
# Núcleos útiles

## Núcleos interesantes para producir energía

| Nucleo | Nº medio de neutrones por fisión | Vida media |
|---|---|---|
| $^{235}$U | 2.3 | 7. x $10^8$ años |
| $^{239}$P | 2.5 | 2.4x$10^4$ años |
| $^{233}$U | 2.5 | 1.6x$10^5$ años |




*Al chocar un neutrón con un núcleo puede tener lugar...*




*Cada proceso con su correspondiente probabilidad*

**La fisión es más probable con neutrones lentos**

*Los neutrones procedentes de la fisión ~ 1 MeV*

*deben ceder energía en las colisiones,*

*para poder inducir una nueva fisión*

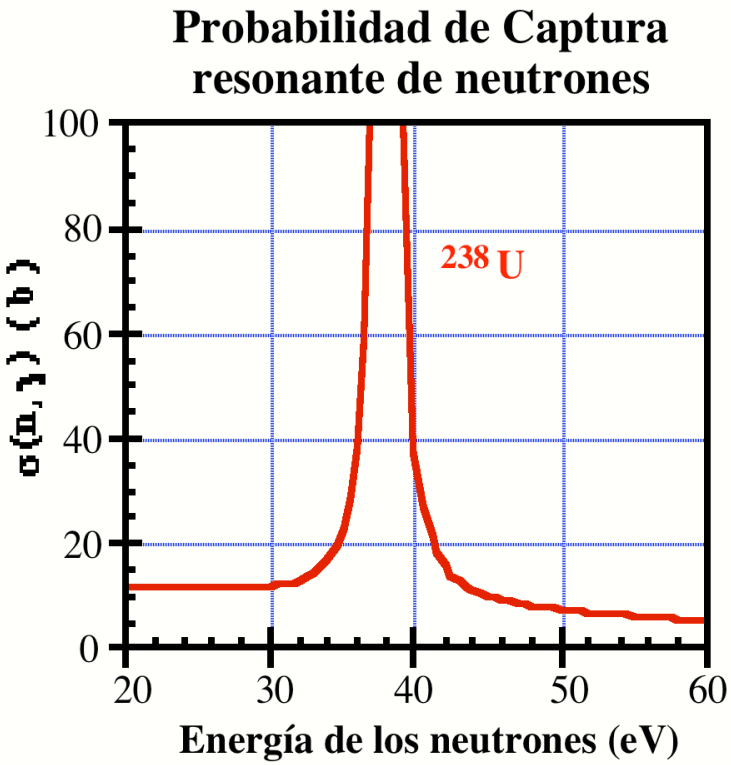
# Núcleos útiles $^{235}U$

***El Uranio se encuentra en la naturaleza***

**$^{235}U$ ( 0.7% ), $^{238}U$ ( 99.3% )**

**El $^{238}U$ absorbe los neutrones rápidos**

***dificulta la reacción en cadena***

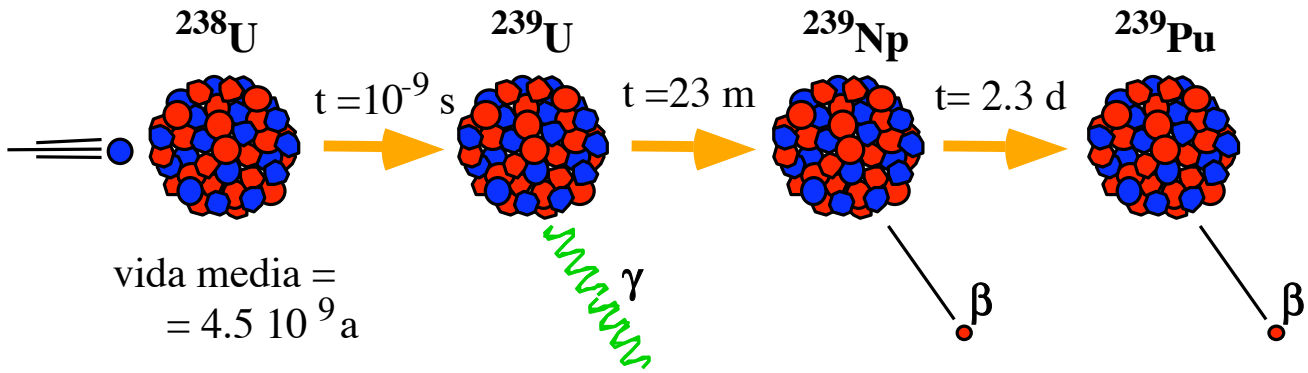


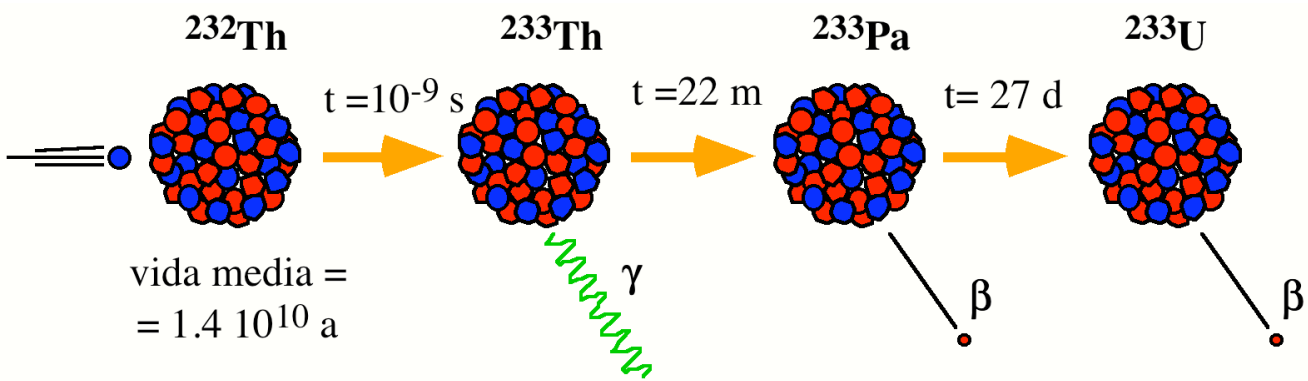
# Núcleos útiles $^{239}Pu$ y $^{233}U$

***$^{239}Pu$ y $^{233}U$ no existen en la Tierra***

*se pueden obtener a partir de..*

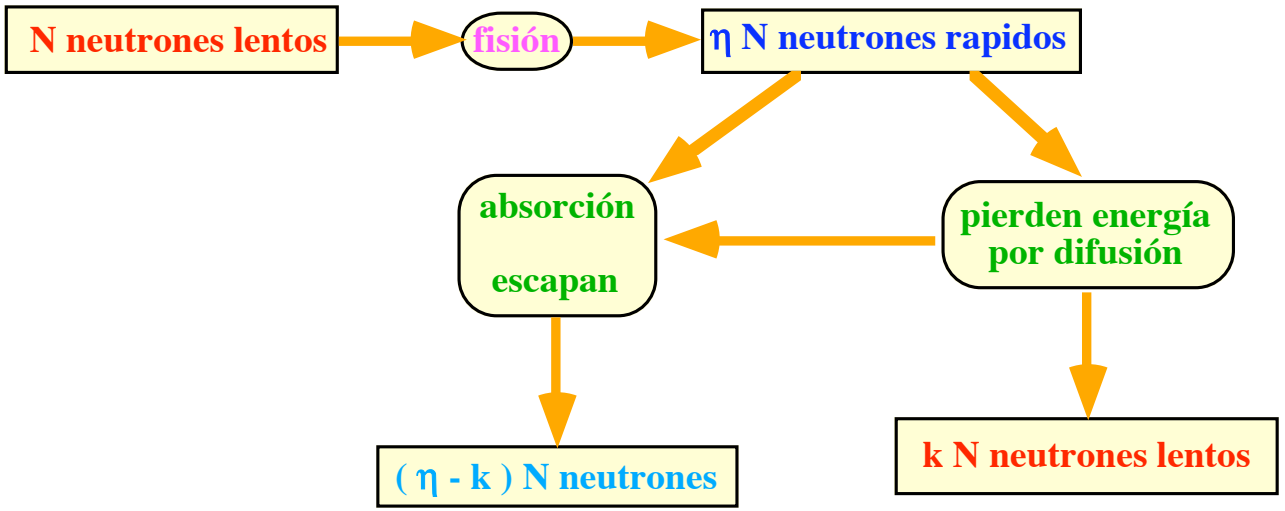
**$^{238}U$ ( 99.3% ) y $^{232}Th$ ( 100% )**



# Flujo de neutrones en la reacción en cadena

**En un tiempo $t_o$ entre fisiones**

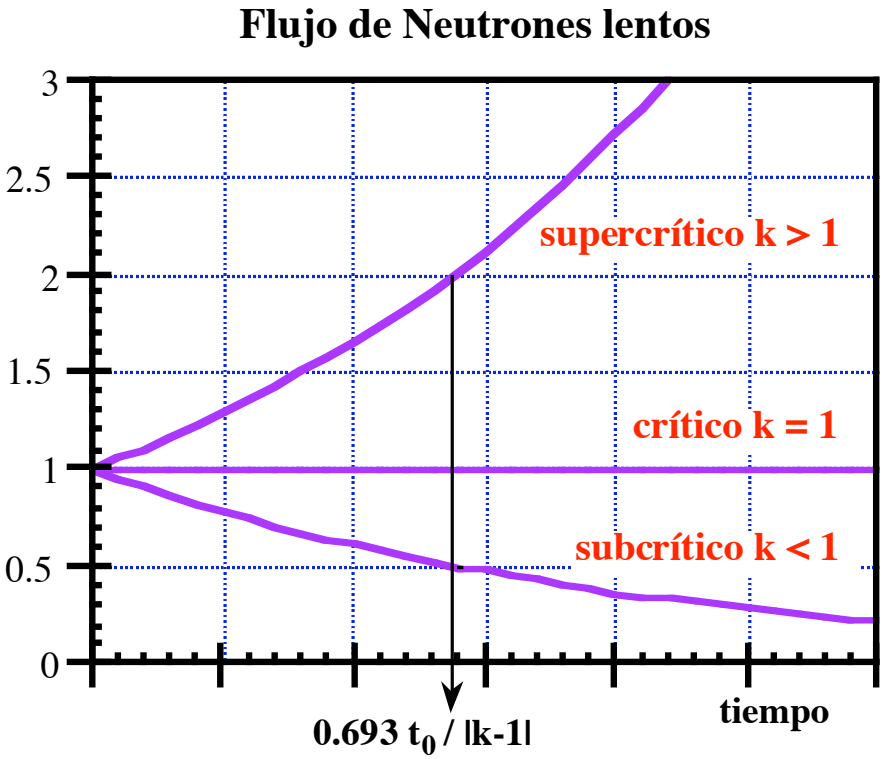



$$\frac{dN}{dt} = \frac{(k-1)}{t_0} N \qquad \Rightarrow \qquad N = N_0 \exp\left[\frac{(k-1)}{t_0} t\right]$$

**k → factor de multiplicación de neutrones lentos**

# Criticidad de la reacción en cadena

**k → factor de multiplicación de neutrones lentos**




*Tiempo necesario para duplicar el flujo de neutrones*

| k | $t_o$ $10^{-3}$ s | $t_o$ $10^{-8}$ s |
|---|---|---|
| 1.1 | $10^{-2}$ s | $10^{-7}$ s |
| 1.01 | 0.1 s | $10^{-6}$ s |
| 1.001 | 1 s | $10^{-5}$ s |

# Aplicación militar

**Para fabricar una bomba nuclear → supercrítico k > 1**

*Mucha energía, en muy poco tiempo y muy concentrada*

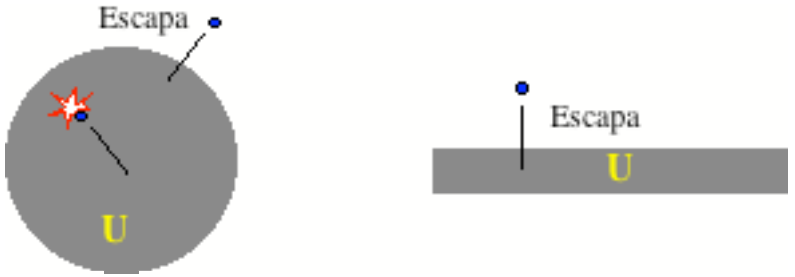
**Si la reactividad se duplica en $t = 10^{-7}$ s → Aumenta un factor $10^{12}$ en t = 4 μs**

**Cantidad pequeña de material fisionable → los neutrones escapan**

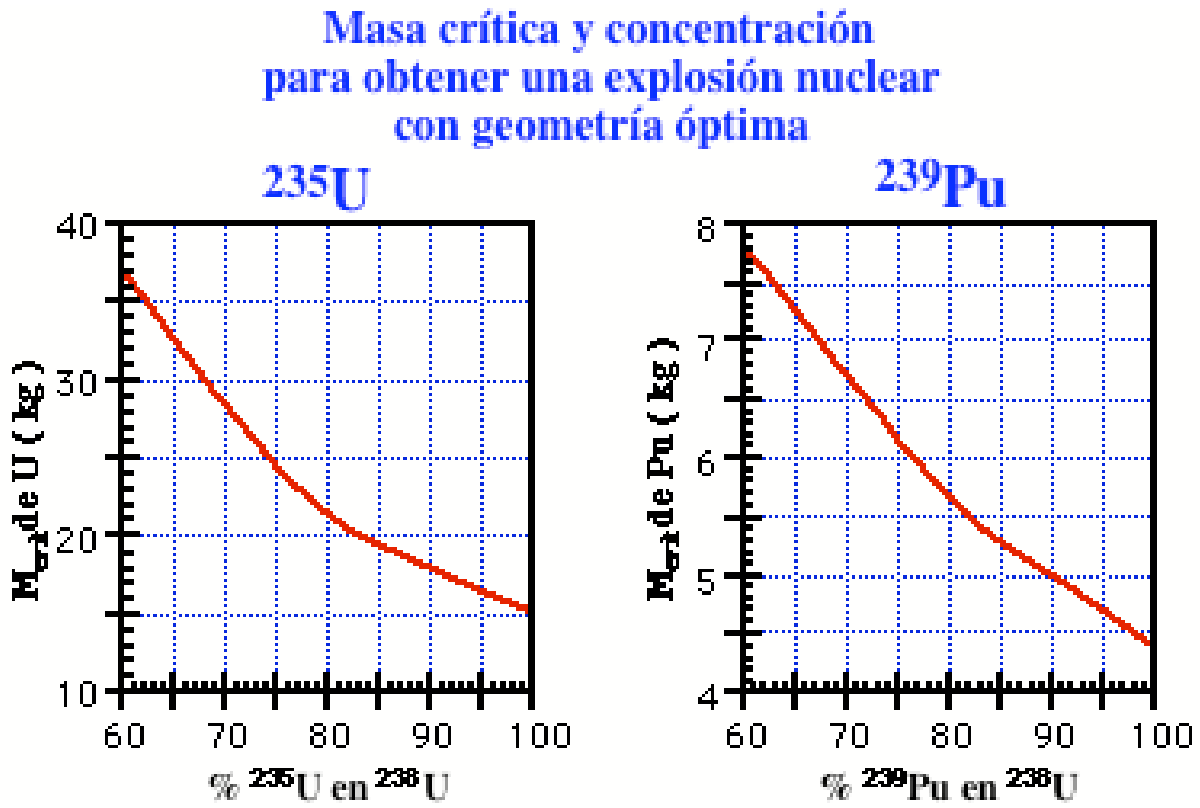
**Baja concentración de material fisionable → los neutrones son absorbidos**

**k < 1**

La geometría también es importante



# Masas críticas para la bomba atómica




Fisión de 1 kg $^{235}U$ ≈ Explosión de 17.5 Toneladas de TNT

# Aplicación Pacífica

**Para obtener energía nuclear controlada → crítico k = 1**

***La multiplicación de neutrones lentos, k, depende de la probabilidad de...***

**fisión , cesión de energía por colisión elástica , absorción y escape**

***Considerando***

- **Las características del nucleo fisionable**
- **La presencia de material que absorba neutrones**
- **La presencia de material que tenga colisiones elásticas con los neutrones, frenándolos**
- **La disposición geométrica de los elementos**

***Se puede diseñar un reactor que alcance la criticidad k = 1***

# El control de la reacción

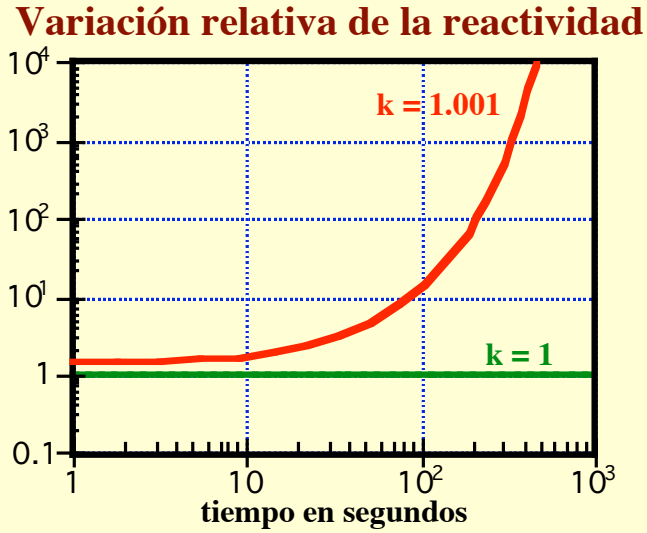
***El reactor debe funcionar normalmente en estado crítico k=1***

***Además, cambiando la disposición, debe poder...***

- **Hacerse muy ligeramente supercrítico $k = 1 + \delta$**
  ***para iniciar la reacción lentamente***

- **Hacerse subcrítico $k < 1$**
  ***para parar la reacción***

**Teniendo en cuenta los neutrones diferidos, se pueden conseguir variaciones de reactividad suficientemente lentas**



# Elementos de un reactor de Fisión: El Combustible

**Material fisionable ( $^{235}U$ ) con baja concentración**

***U natural ( 0.7 %)***

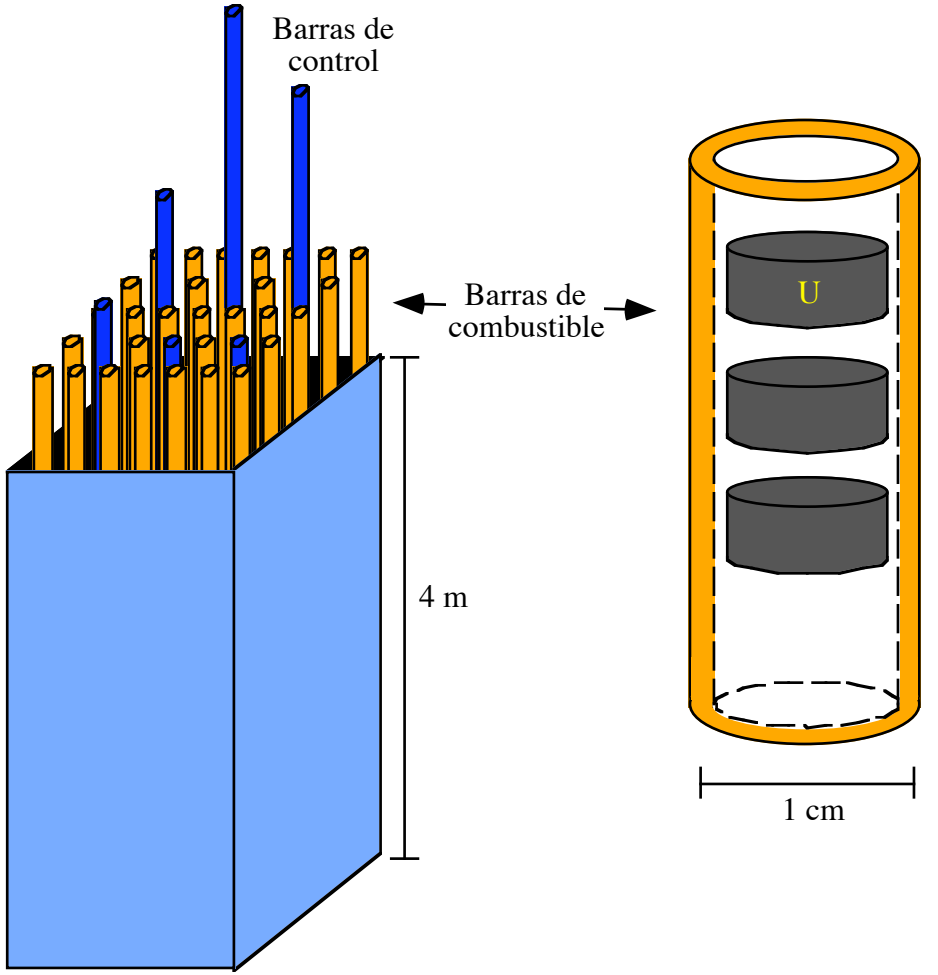
***ligeramente enriquecido ( 3 - 4 %)***

**La parte no fisionable ( $^{238}U$ ) actua como absorbente de neutrones ( Produciendo $^{239}Pu$ )**

**Reactor de 1000 MW tiene**

**40 000 barras ≈ 70 Tm de U**

***Según se consumen se van cambiando***

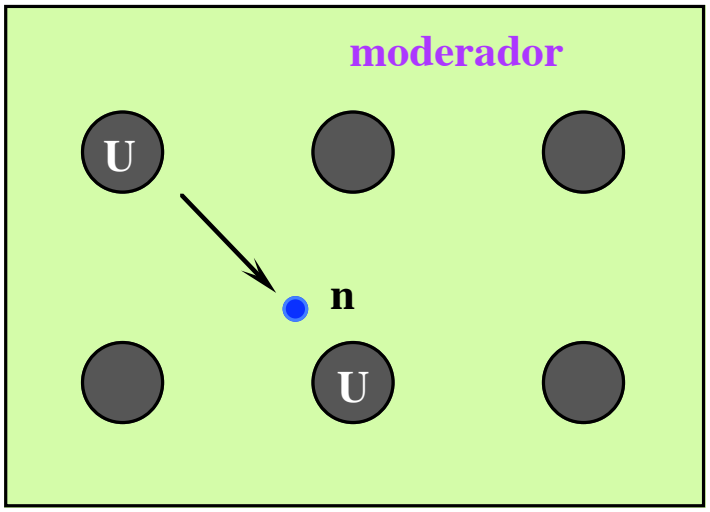



***Las vainas de las barras de combustible deben resistir el flujo neutrónico***

**Zircalloy**
**Acero inoxidable**

# Elementos de un reactor de Fisión: El Moderador

*Frenando los neutrones hace posible la reacción en cadena*




**Se evita la captura resonante de neutrones por el $^{238}U$**

**Un buen moderador debe cumplir:**

- **No ser un absorbente de neutrones**
- **Tener elevada densidad atómica**
- **Tener poco peso molecular**

*Agua $H_2O$, Agua Pesada $D_2O$, Grafito $C$*

# Elementos de un reactor de Fisión: Barras de control y fluido refrigerante.

- **Barras de control**

  ***Permiten aumentar o disminuir el número de neutrones***

| **Material muy absorbente de neutrones** | | |
|---|---|---|
| **Sacándolas** | **–** | **Aumentan la reactividad** |
| **Metiéndolas** | **–** | **Paran la reaccióm** |

***Compuestos de Boro y Cadmio***

- **Fluido Refrigerante**

  ***Impide que las barras se calienten demasiado***
  ***y extrae el calor generado en el reactor para aprovecharlo***

**Gases** $CO_2$ , **Líquidos** $H_2O$ , $D_2O$ , ***Sodio fundido***

# Elementos de un reactor de Fisión: Generación de Electricidad

*Similar a las centrales térmicas convencionales*

- **Conversión energía térmica en mecánica**

  ***Se produce vapor de agua a partir del refrigerante***

  **directamente o en un intercambiador de calor**

  ***El vapor mueve las turbinas***

- **Eficiencia Termodinámica**

  ***El vapor debe enfrirse, condensándose, al salir de la turbina***

  **El circuito de refrigeración puede ser**

  - **abierto, río o embalse 50 $m^3/s$ agua 30 °C**
  - **cerrado, torres de refrigeración 1 $m^3/s$ vapor**

- **Generación de Electricidad**

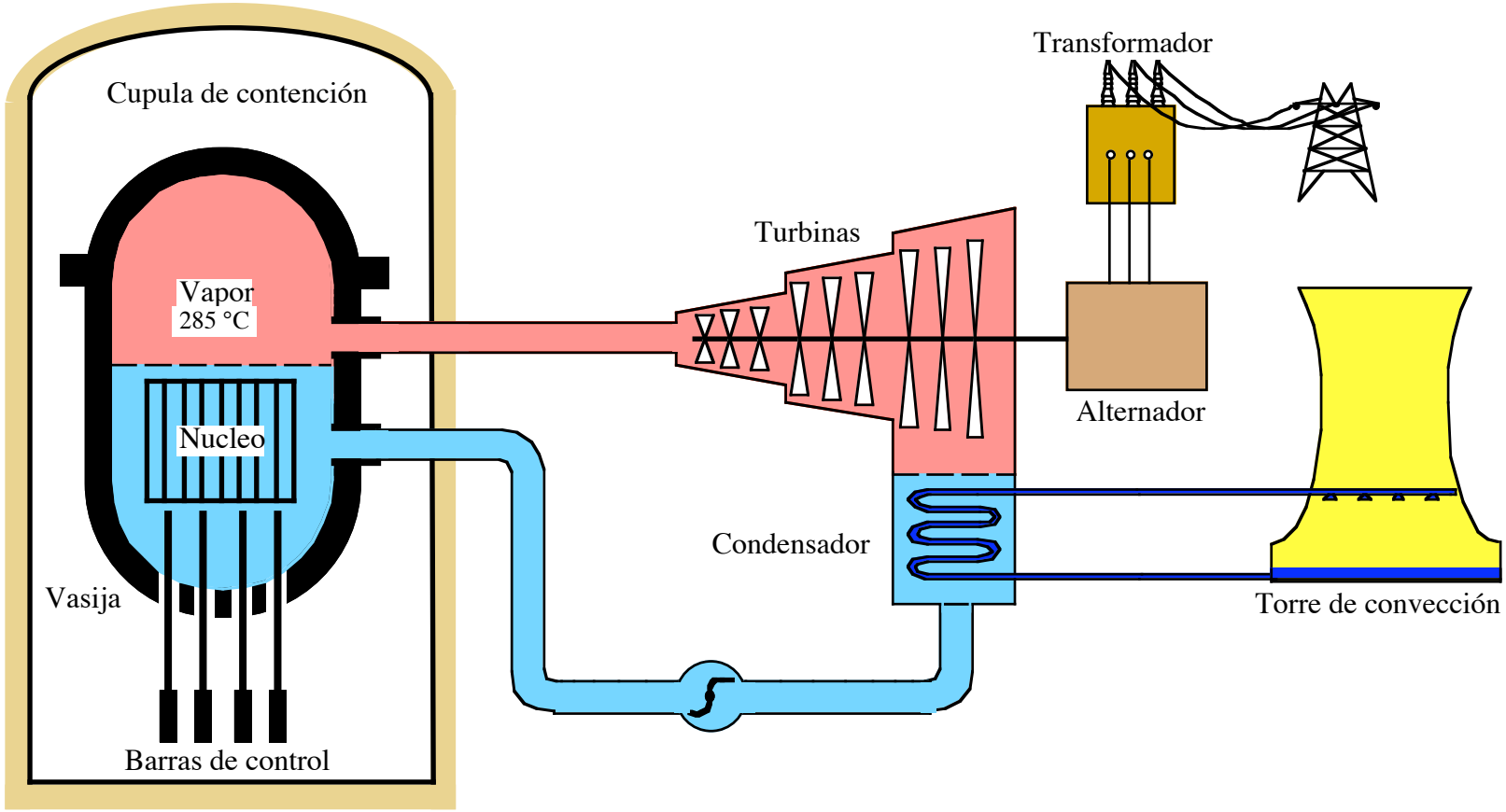
  ***La energía mecánica se convierte en eléctrica en un alternador***

**La eficiencia de todo el proceso ≈ 33 %**

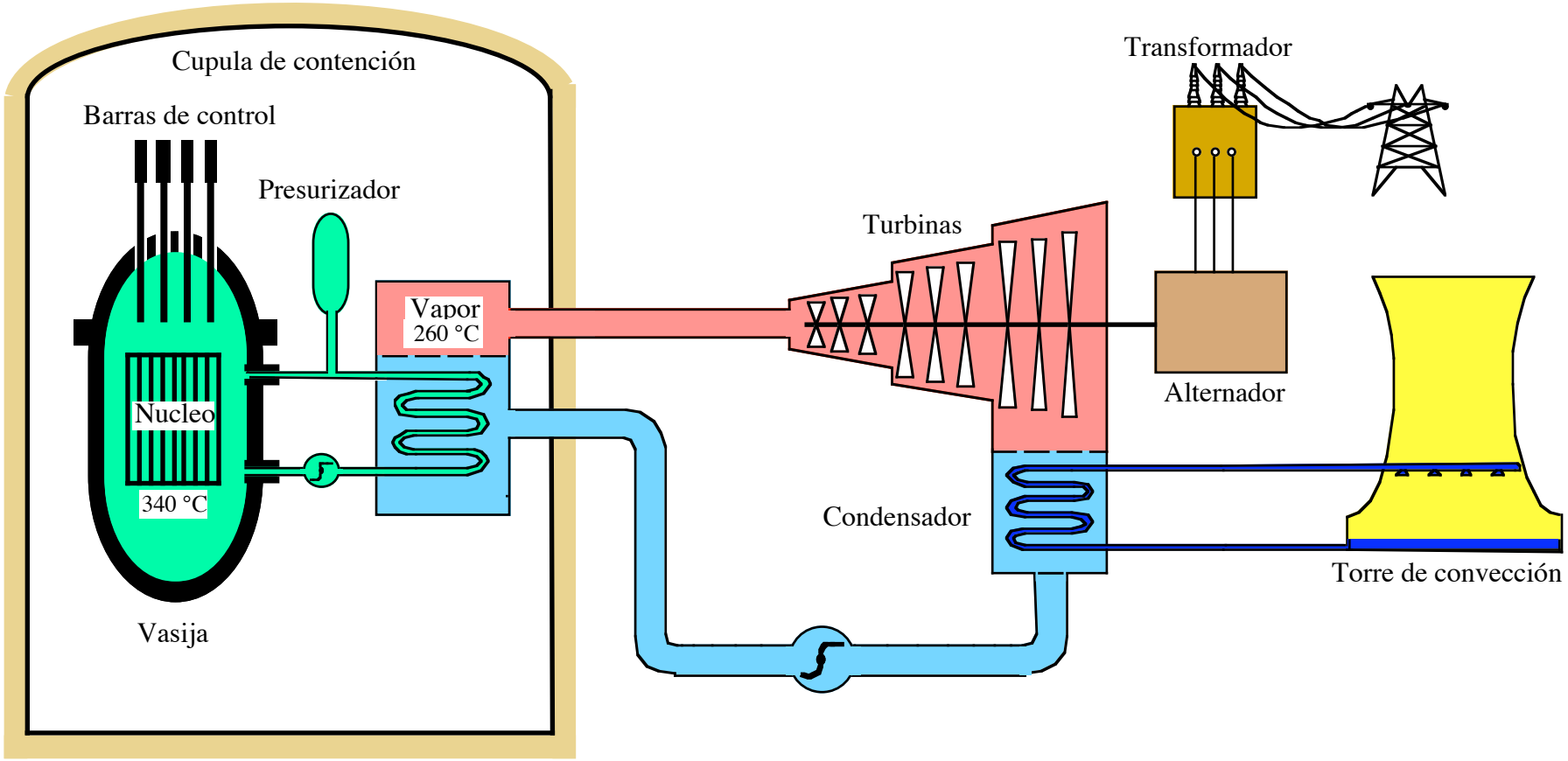
# Tipos más habituales de reactores

- **PWR** **Reactor de agua Presurizada** — ***U enriquecido, $H_2O$ a presión como moderador y refrigerante***
- **BWR** **Reactor de agua en ebullición** — ***U enriquecido, $H_2O$ en ebullición como moderador y refrigerante***
- **GGR** **Grafito-Gas** — ***U natural, Grafito como moderador y $CO_2$ como refrigerante***
- **Reactor Rápido** — ***$^{239}Pu$ o $^{233}U$ o U muy enriquecido, sin moderador y Na como refrigerante***

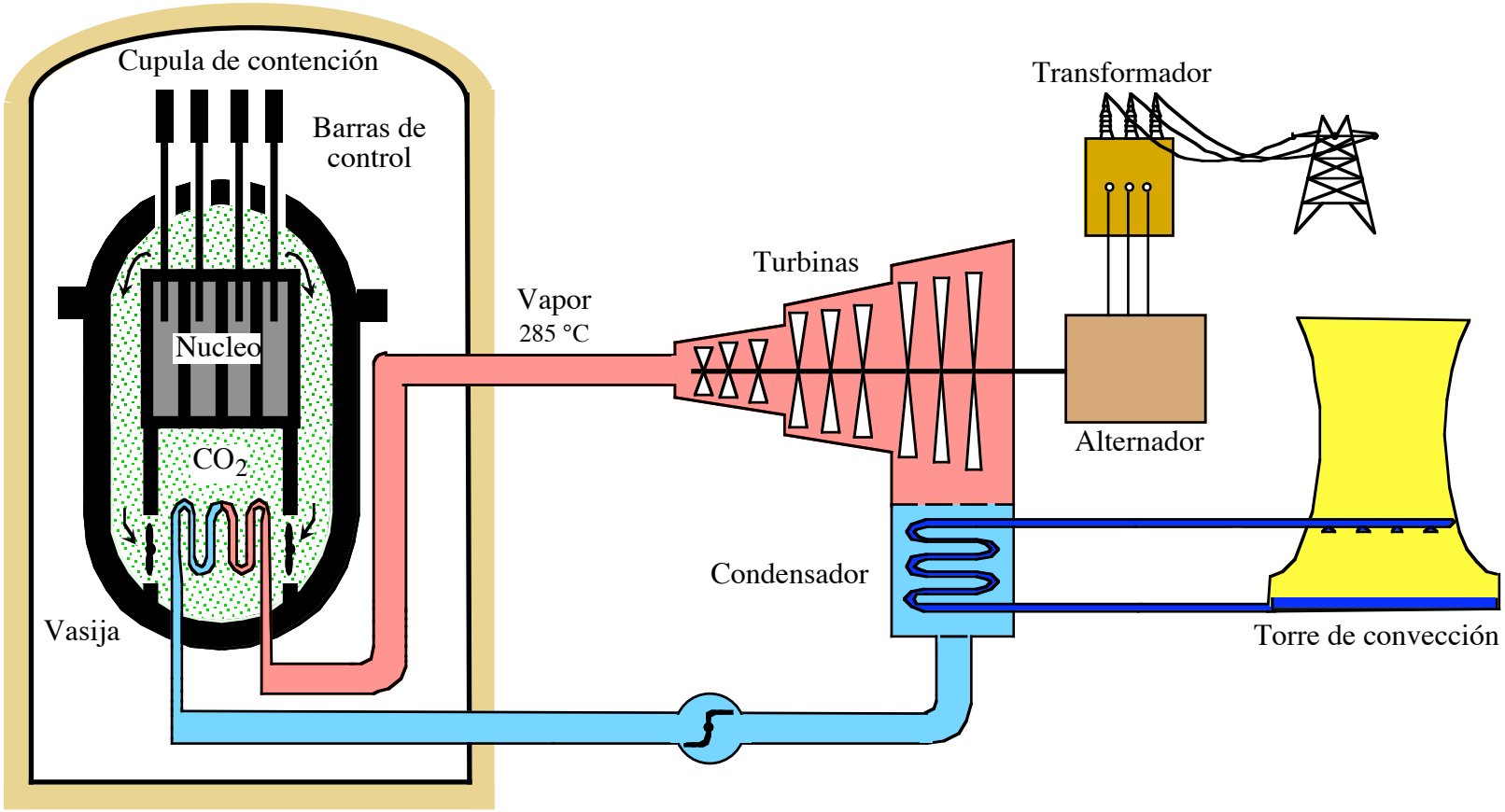
# Reactor de agua en ebullición (BWR)



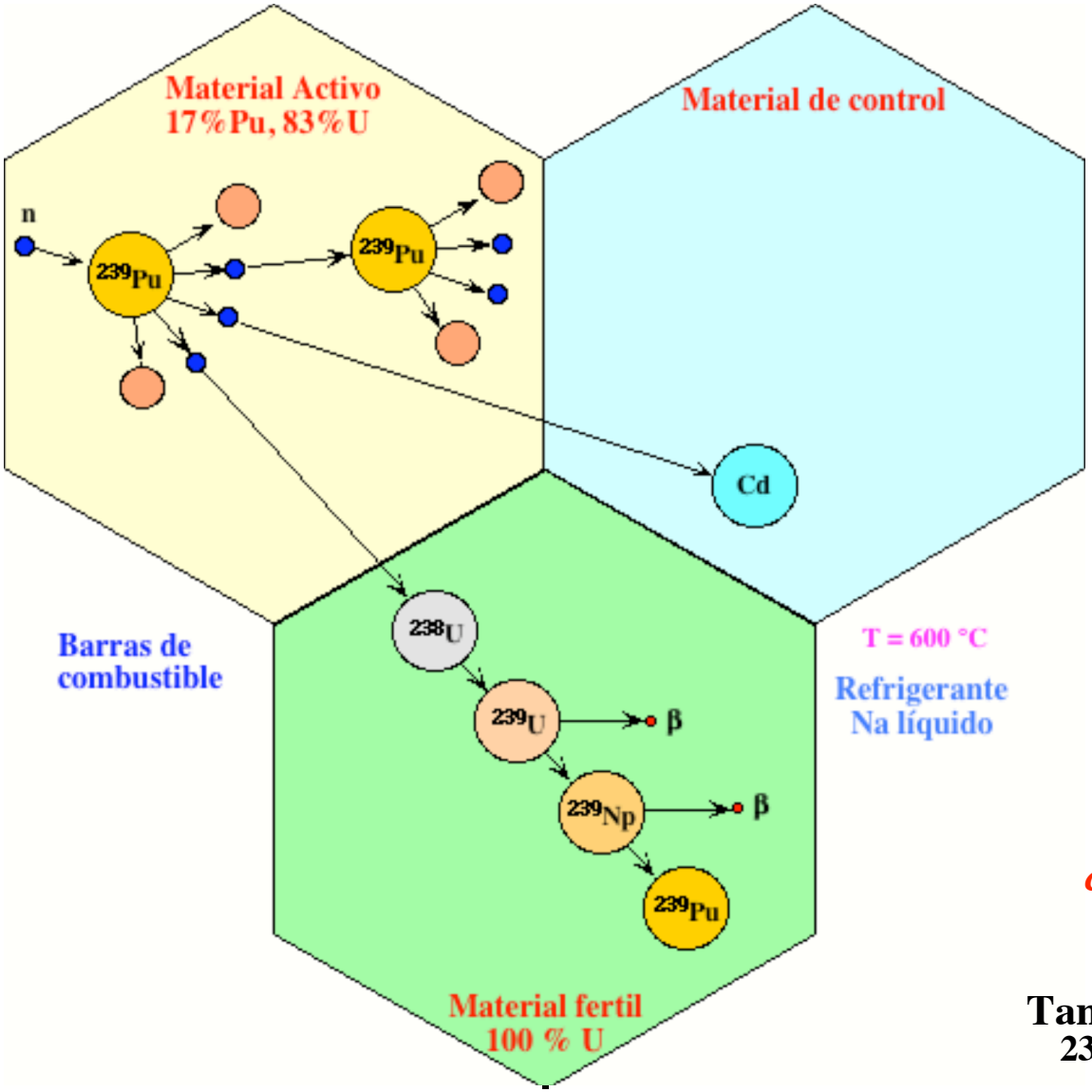
# Reactor de agua presurizada (PWR)



# Reactor de Uranio natural y Grafito-Gas



# Reactor reproductor rápido




- **Un neutrón mantiene la fisión en cadena del $^{239}Pu$**
- **Los demás neutrones pueden generar $^{239}Pu$ a partir del $^{238}U$**

***Puede generar más combustible del que consume***

**El doble en 10-20 años**

**También puede emplearse la pareja $^{233}U$ ( activo ) - $^{232}Th$ ( fertil )**