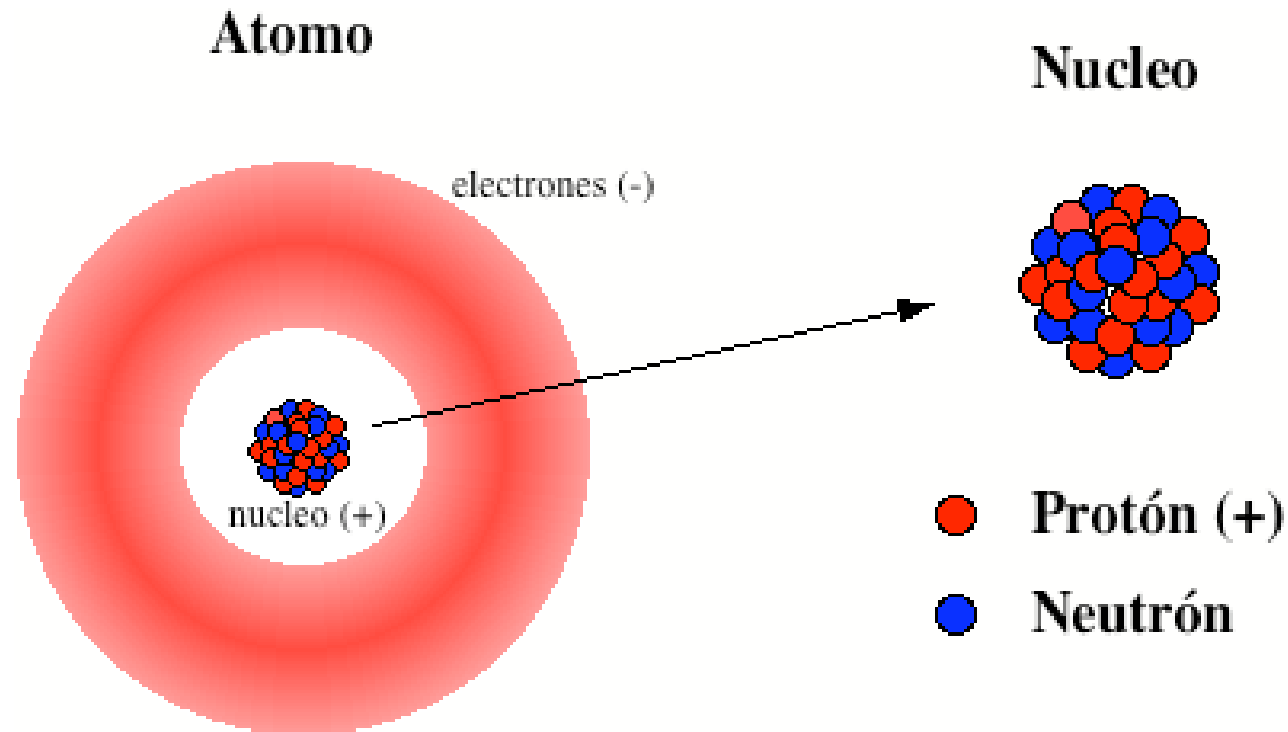




Física y Tecnología Energética

**12 - Energía Nuclear de Fisión.
Reactores.**

Núcleos e Isótopos

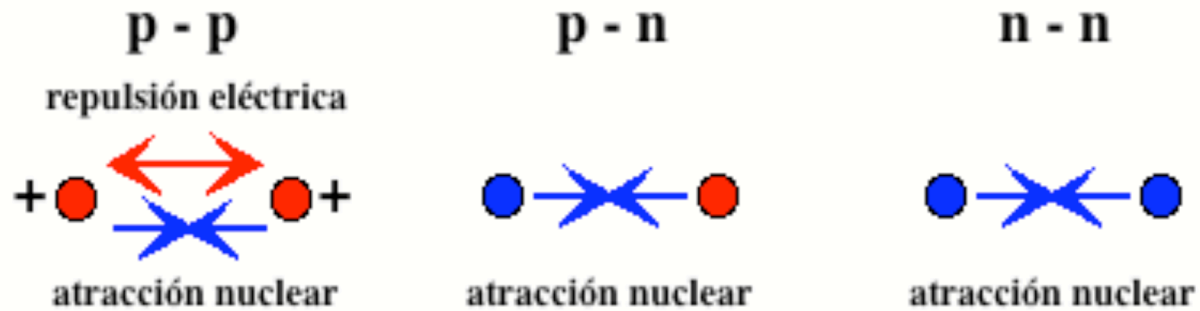


$$\text{Núcleo} \begin{cases} Z \text{ Protones} \\ N \text{ Neutrones} \end{cases} \rightarrow A = N + Z \text{ Nucleones}$$

Z *Nombre, propiedades químicas*

N, A *Isótopo, masa*

Estabilidad nuclear



atracción nuclear

¿ se compensan ?

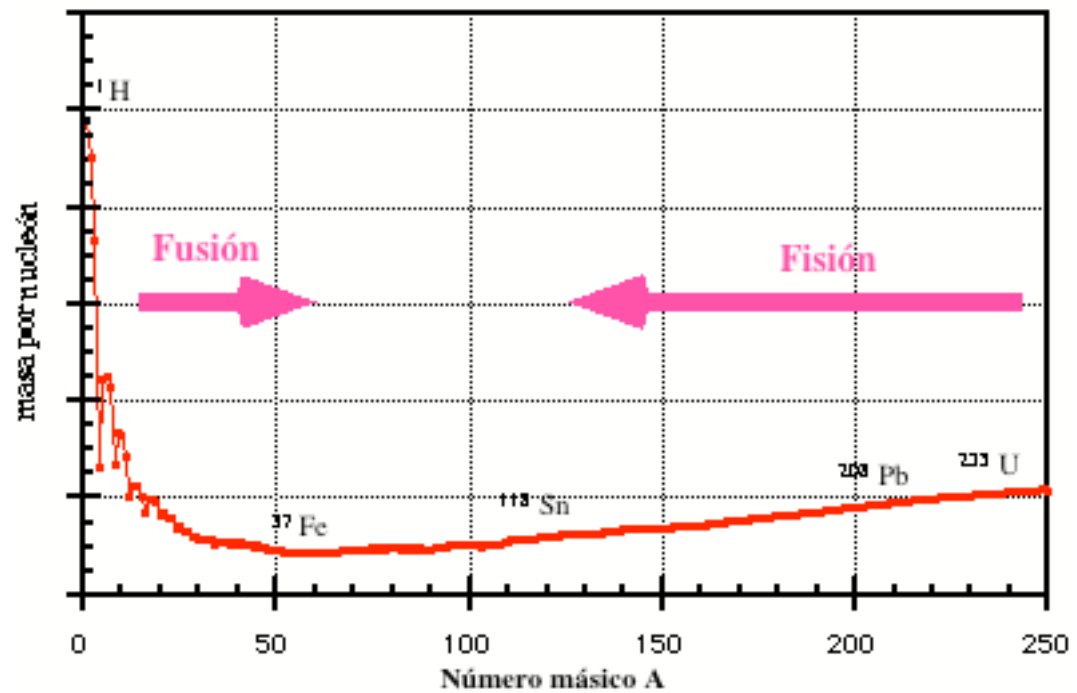
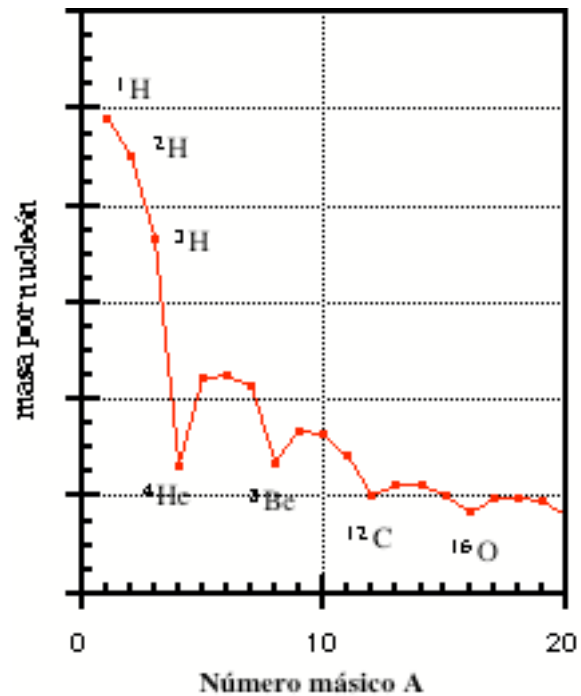
repulsión eléctrica



núcleos estables e inestables

Masas nucleares y energía

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



Fusión de núcleos pequeños

Fisión de núcleos grandes



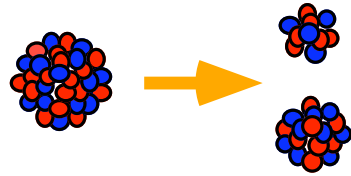
Disminución de masa



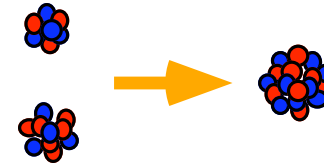
Energía

$$E = mc^2$$

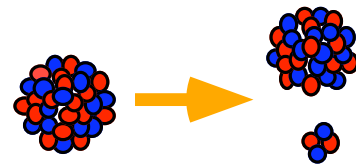
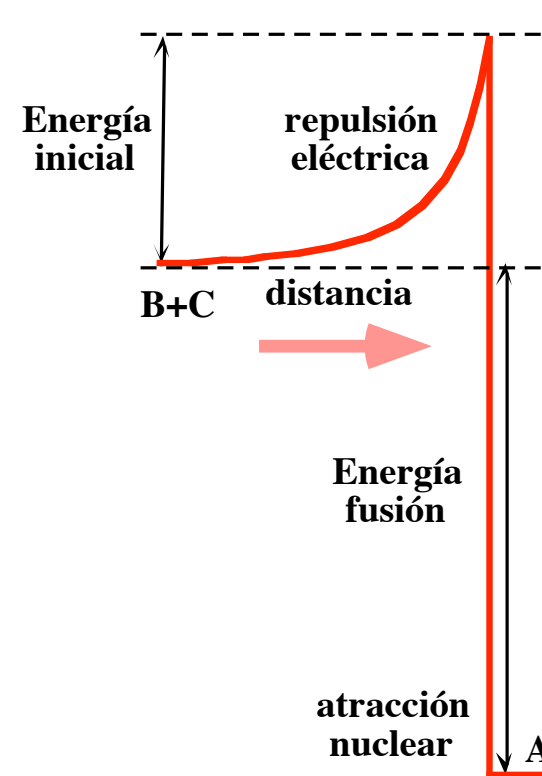
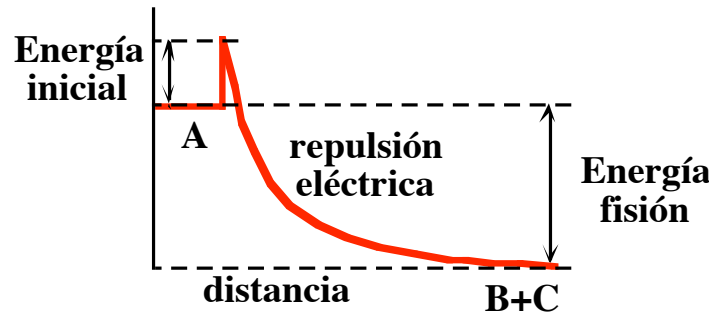
Reacciones nucleares y radiactividad



Fisión $A \rightarrow B+C$



Fusión $B+C \rightarrow A$



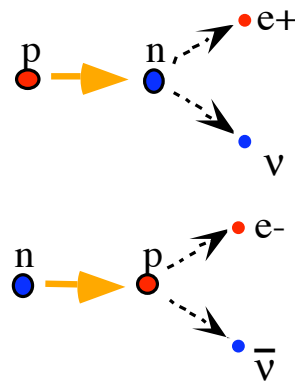
Emisión radiactiva α

Probabilidad de emisión espontánea
por efecto túnel

$\tau = 1 \text{ s} - 10 \text{ 000 años}$

Otras emisiones radiactivas

Desintegración β

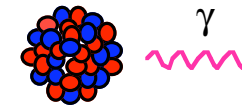


Provocada por la interacción “débil”

Probabilidad de emisión espontánea
si es energéticamente favorable

$\tau = 1 \text{ ms} - 10 \text{ horas}$

Emisión γ



Recolocación de nucleones
en estado excitado

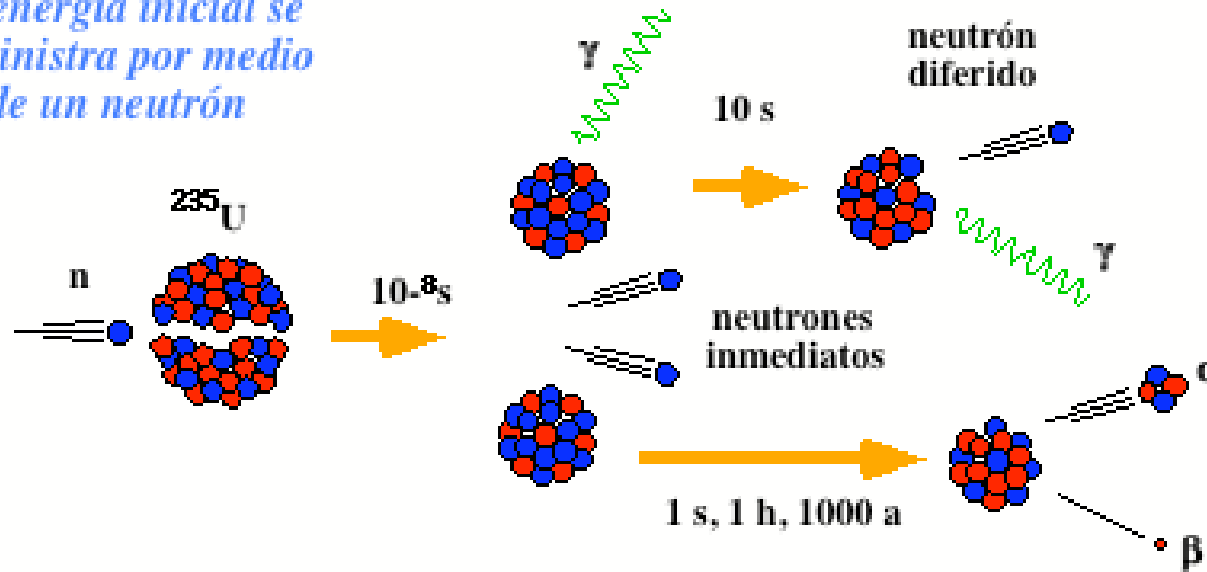
Probabilidad de emisión espontánea

$\tau = 1 \text{ ns}$

Frecuentemente acompaña
a los demás procesos

La reacción de Fisión del Uranio

La energía inicial se suministra por medio de un neutrón



$$\begin{aligned}
 1 \text{ eV} &= \\
 &= 1.6 \times 10^{-19} \text{ J} = \\
 &= 3.8 \times 10^{20} \text{ cal}
 \end{aligned}$$

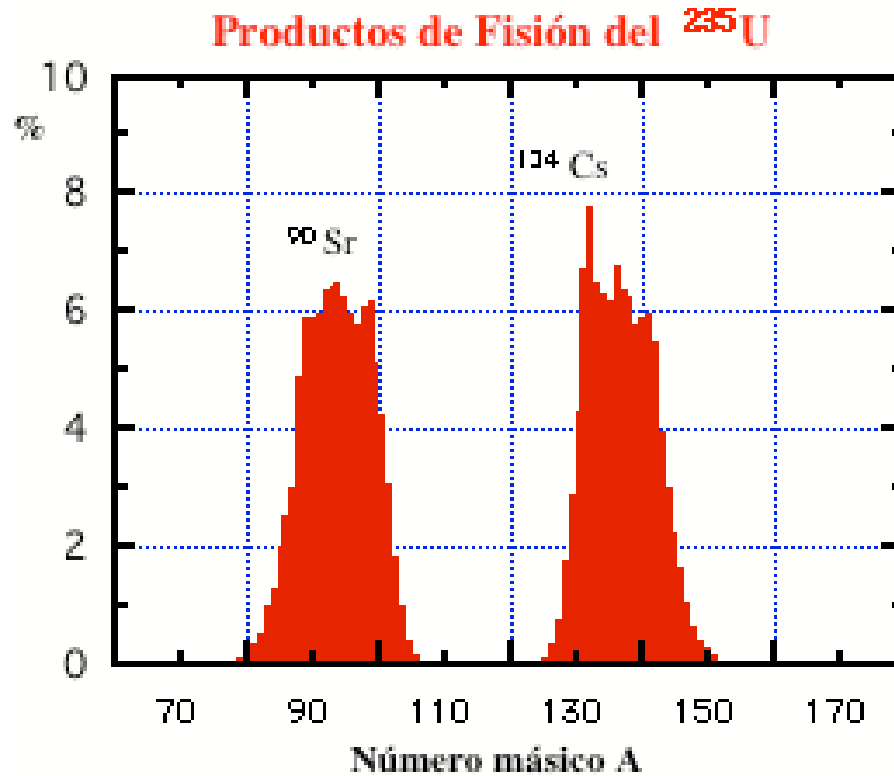
*3×10^{10} Fisiones por s
de $^{235}\text{U} = 1$ Watio*

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

Energía liberada en la fisión

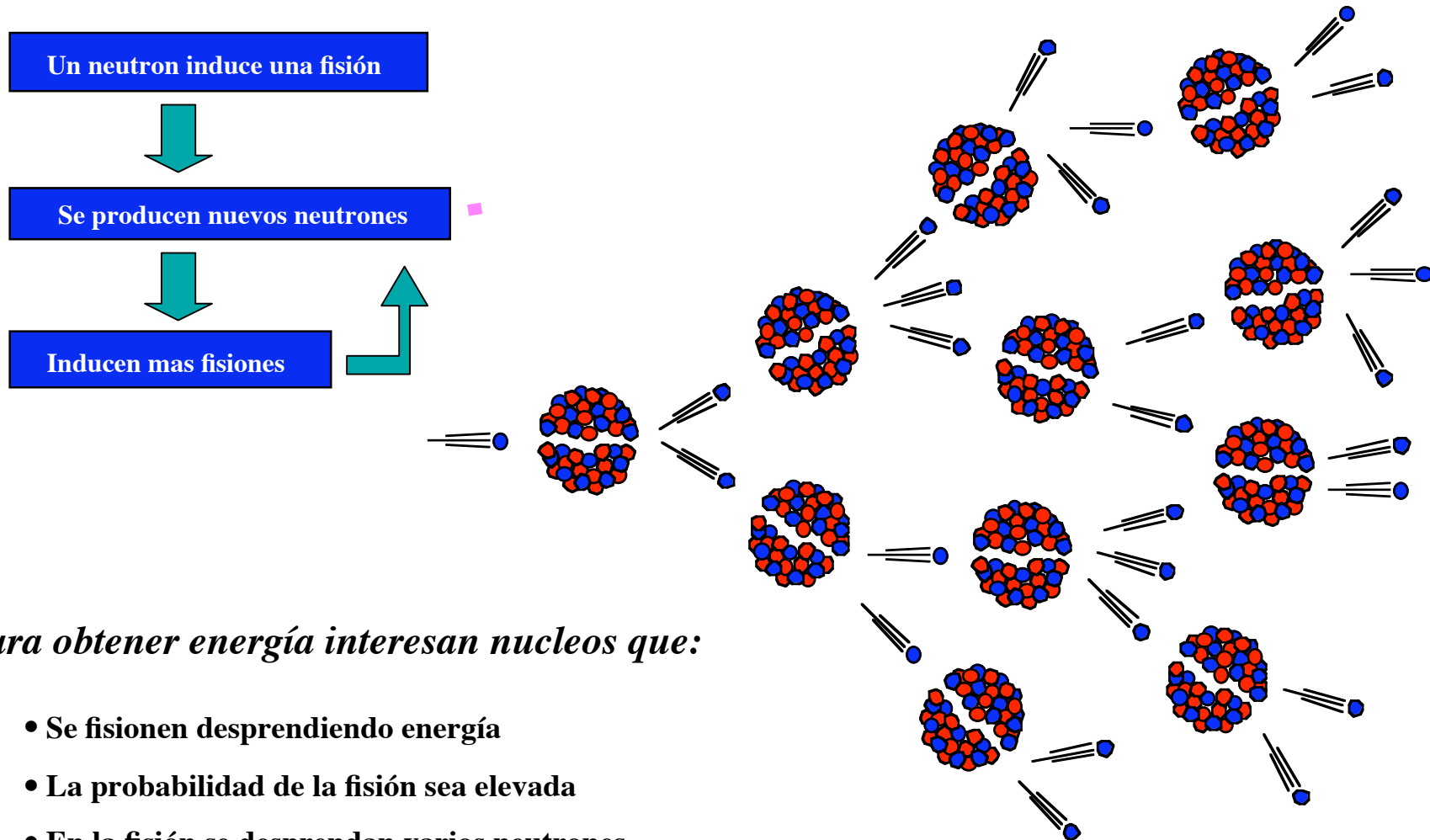
Productos de fisión	166 MeV
Neutrones (E. Cinética)	5 MeV
Rayos gamma	8 MeV
Radiactividad posterior (beta, gamma, neutrinos)	27 Mev
	<hr/>
	206 Mev

La reacción de Fisión del Uranio



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

La reacción en cadena



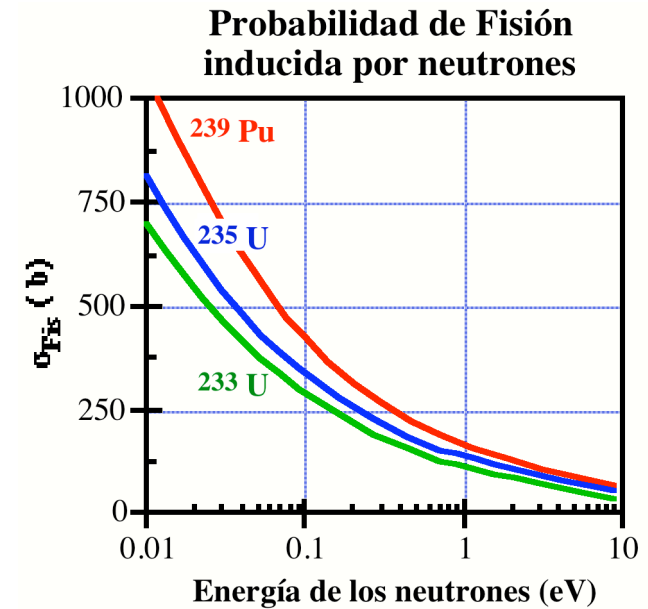
Para obtener energía interesan nucleos que:

- 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

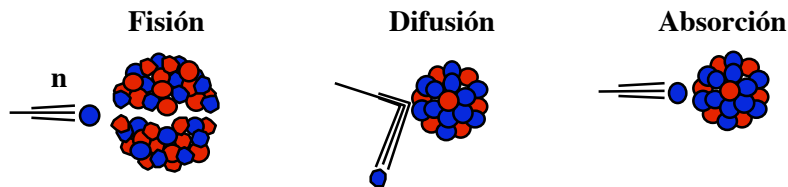
Núcleos útiles

Núcleos interesantes para producir energía

Nucleo	Nº medio de neutrones por fisión	Vida media
^{235}U	2.3	$7. \times 10^8$ años
^{239}P	2.5	2.4×10^4 años
^{233}U	2.5	1.6×10^5 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 $\sim 1 \text{ MeV}$

deben ceder energía en las colisiones,

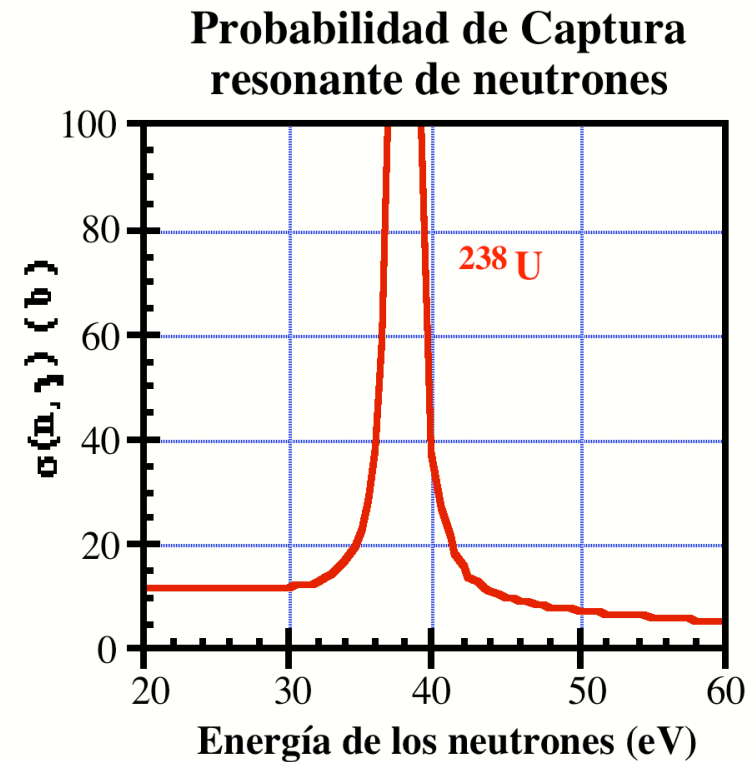
para poder inducir una nueva fisión

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

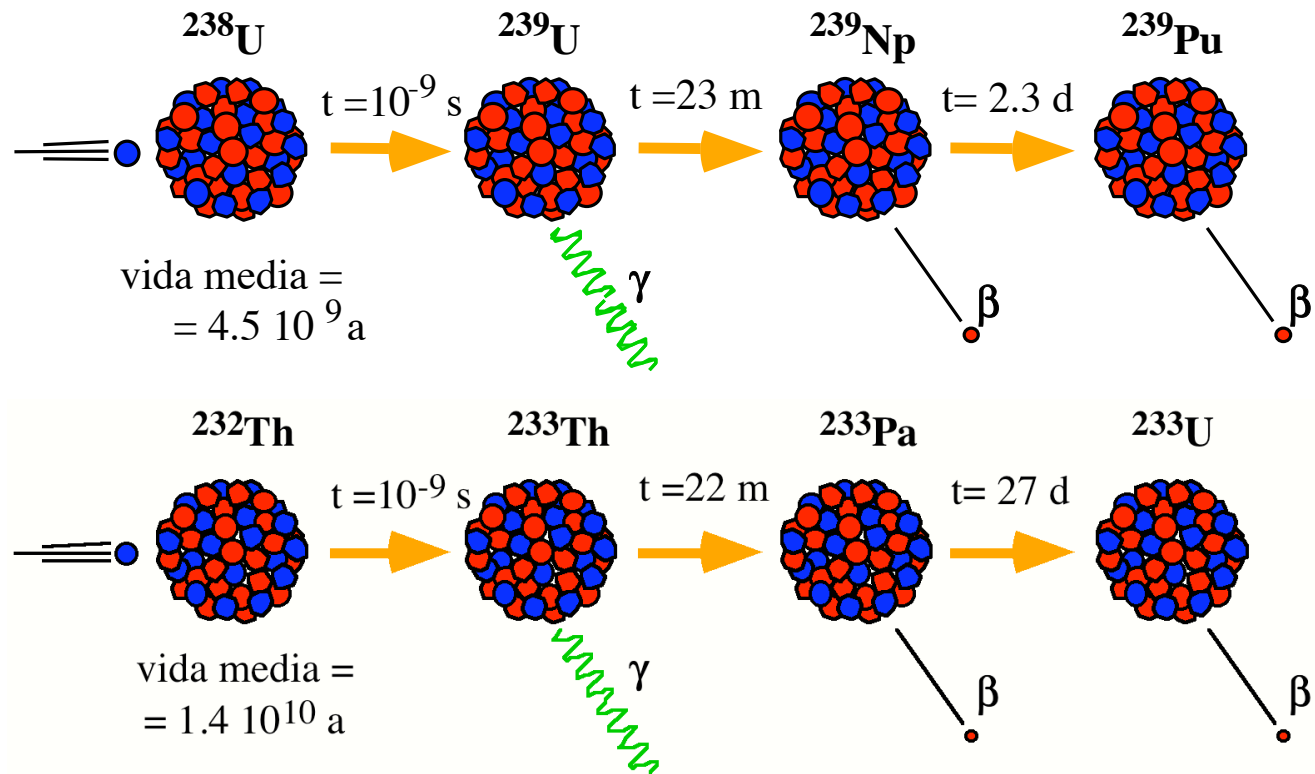


Núcleos útiles ^{239}Pu y ^{233}U

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

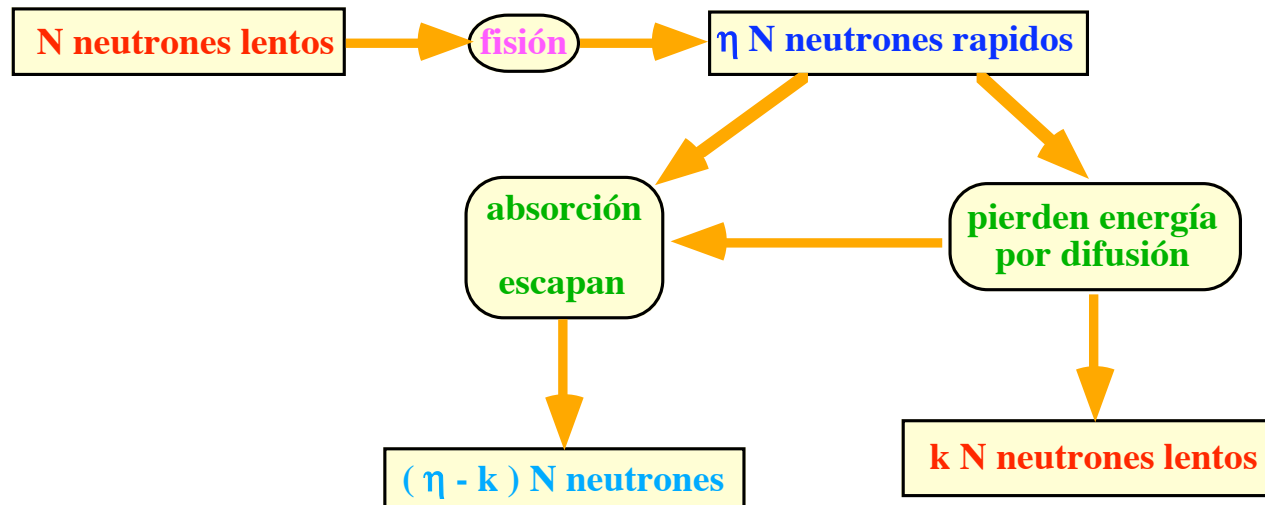
se pueden obtener a partir de..

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



Flujo de neutrones en la reacción en cadena

En un tiempo t_0 entre fisiones

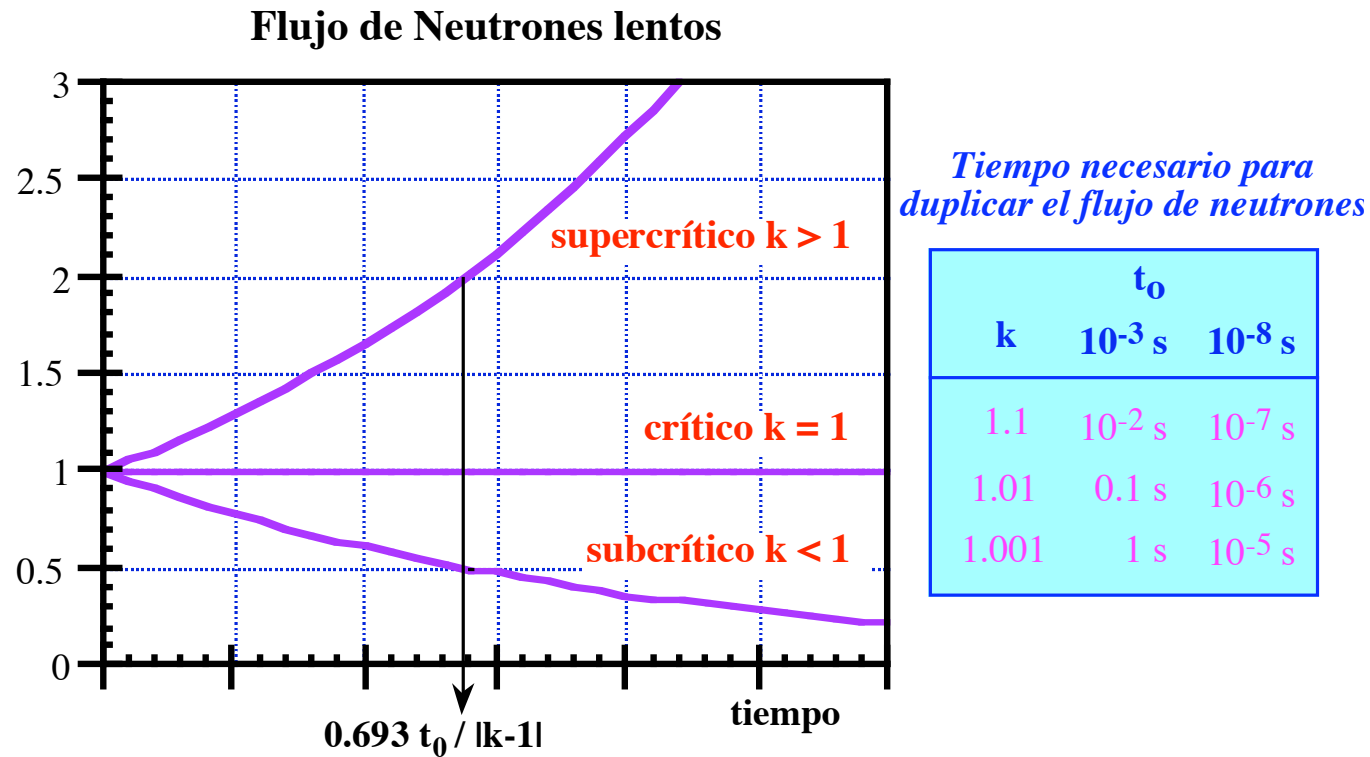


$$\frac{dN}{dt} = \frac{(k-1)}{t_0} N \quad \Rightarrow \quad N = N_0 \exp\left[\frac{(k-1)}{t_0} t\right]$$

k → factor de multiplicación de neutrones lentos

Criticidad de la reacción en cadena

k → factor de multiplicación de neutrones lentos



Aplicación militar

Para fabricar una bomba nuclear \rightarrow 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 $t = 4 \mu\text{s}$

Cantidad pequeña
de material fisionable



los neutrones escapan



$k < 1$

Baja concentración
de material fisionable



los neutrones son absorbidos



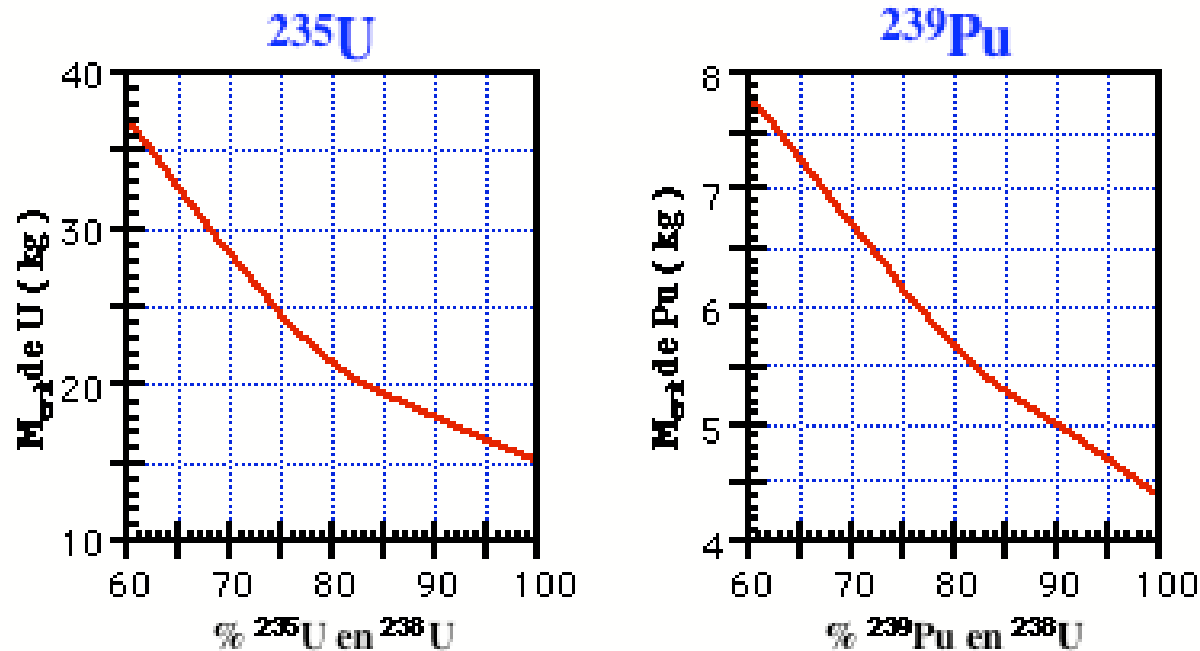
$k < 1$

La geometría también es importante



Masas críticas para la bomba atómica

Masa crítica y concentración
para obtener una explosión nuclear
con geometría óptima



Fisión de 1 kg ^{235}U \approx 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 núcleo 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 $k = 1$

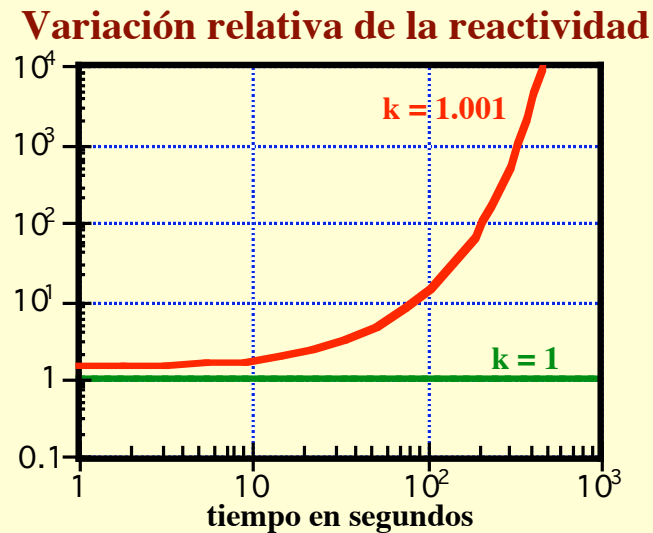
El control de la reacción

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 %)

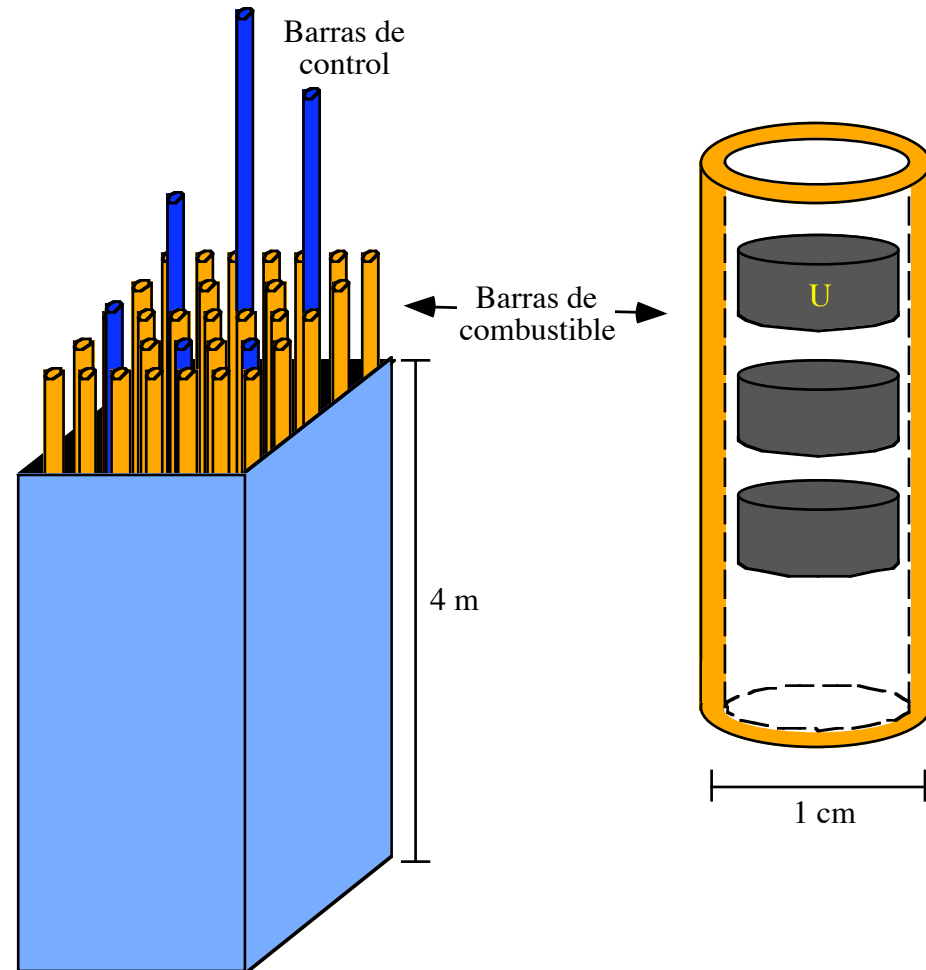
ligeramente enriquecido (3 - 4 %)

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

Reactor de 1000 MW tiene

40 000 barras \approx 70 Tm de U

Según se consumen se van cambiando



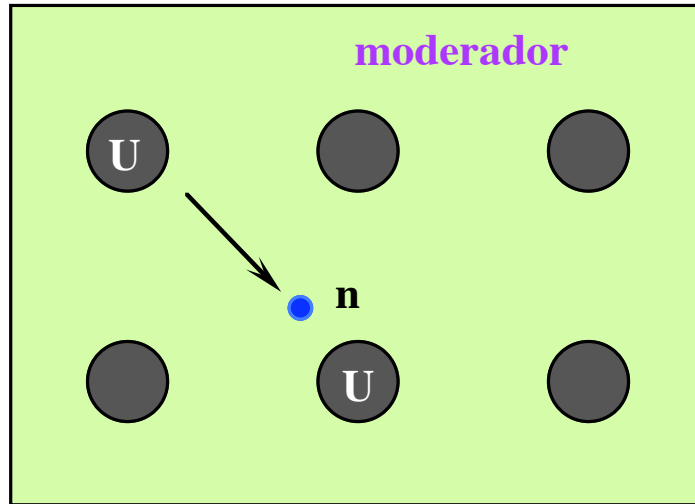
Las vainas de las barras de combustible
deben resistir el flujo neutrónico



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 - Parar la reacción

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 enfriarse, condensándose, al salir de la turbina

El circuito de refrigeración puede ser

- abierto, río o embalse 50 m³/s agua 30 °C
- cerrado, torres de refrigeración 1 m³/s vapor

- **Generación de Electricidad**

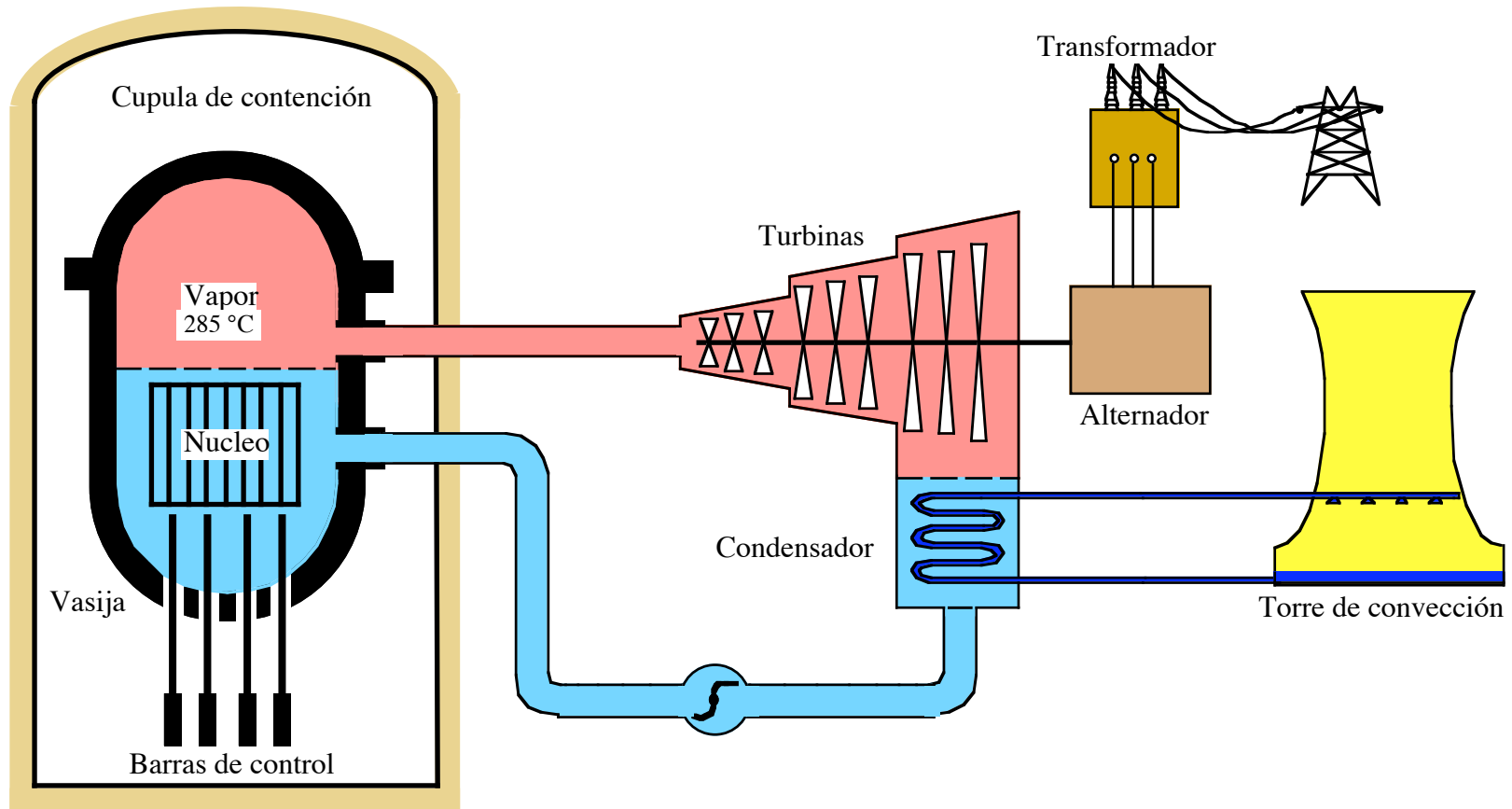
La energía mecánica se convierte en eléctrica en un alternador

La eficiencia de todo el proceso \approx 33 %

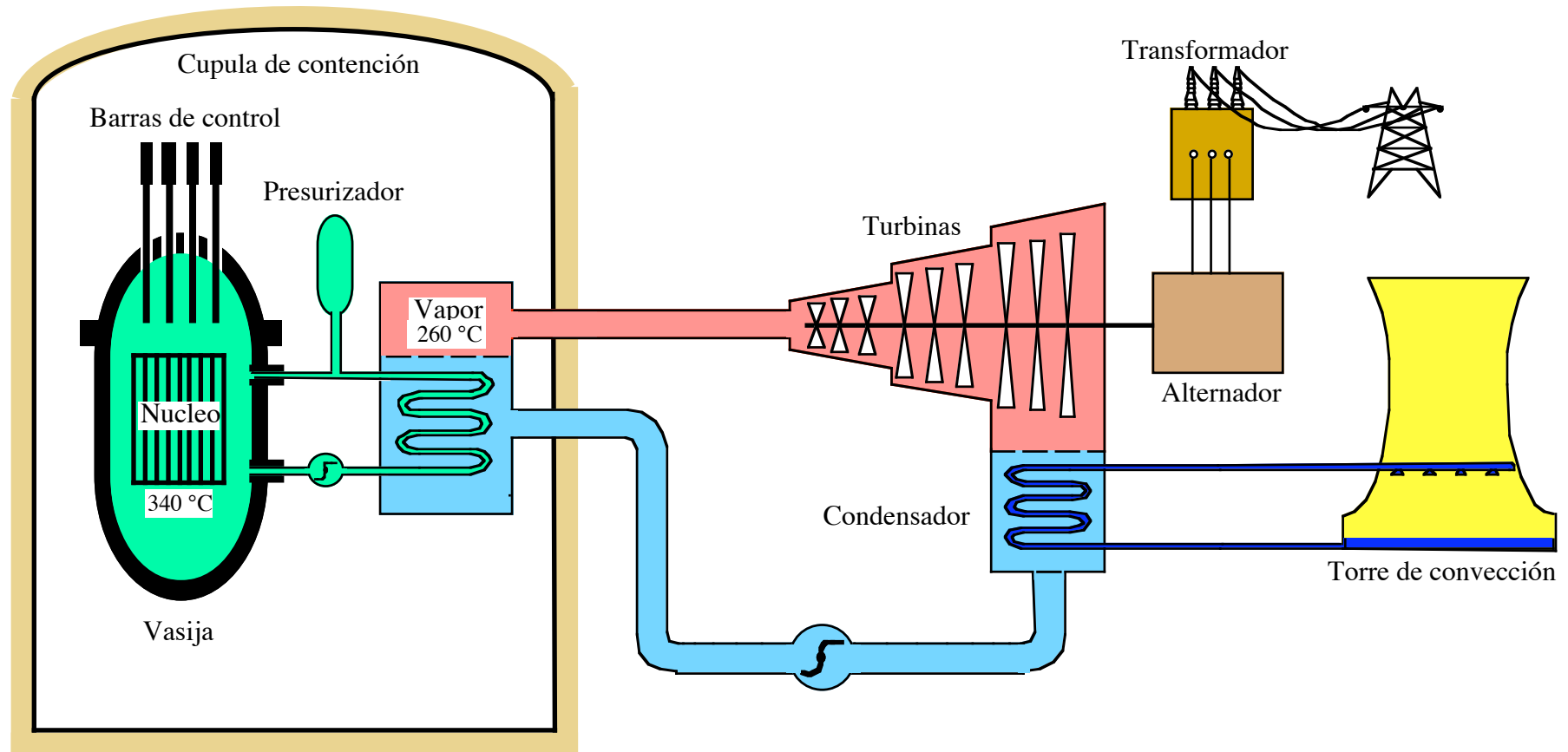
Tipos más habituales de reactores

- **PWR** **Reactor de agua Presurizada** *U enriquecido, H₂O a presión como moderador y refrigerante*
- **BWR** **Reactor de agua en ebullición** *U enriquecido, H₂O en ebullición como moderador y refrigerante*
- **GGR** **Grafito-Gas** *U natural, Grafito como moderador y CO₂ como refrigerante*
- **Reactor Rápido** *²³⁹Pu o ²³³U o U muy enriquecido, sin moderador y Na como refrigerante*

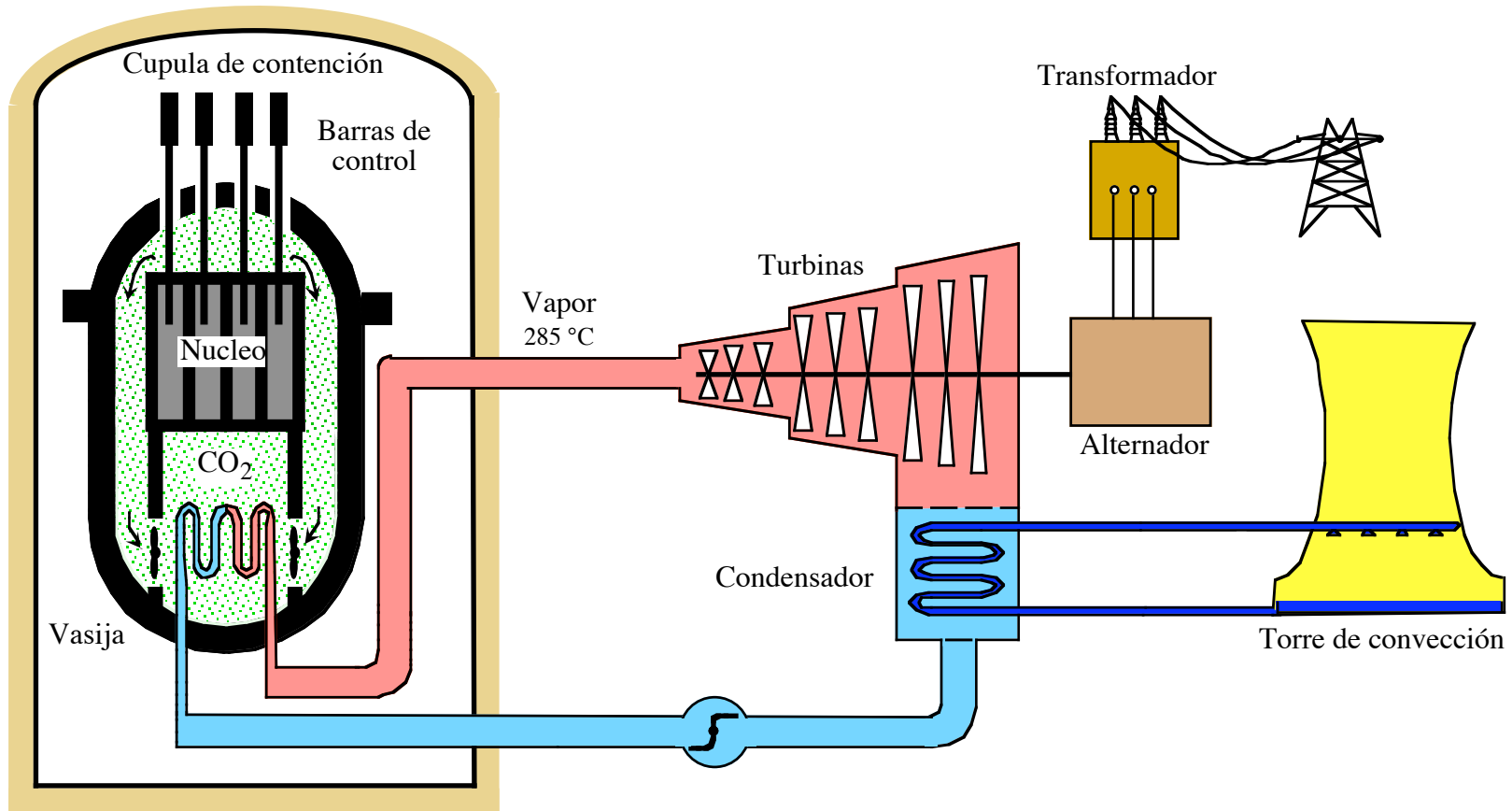
Reactor de agua en ebullición (BWR)



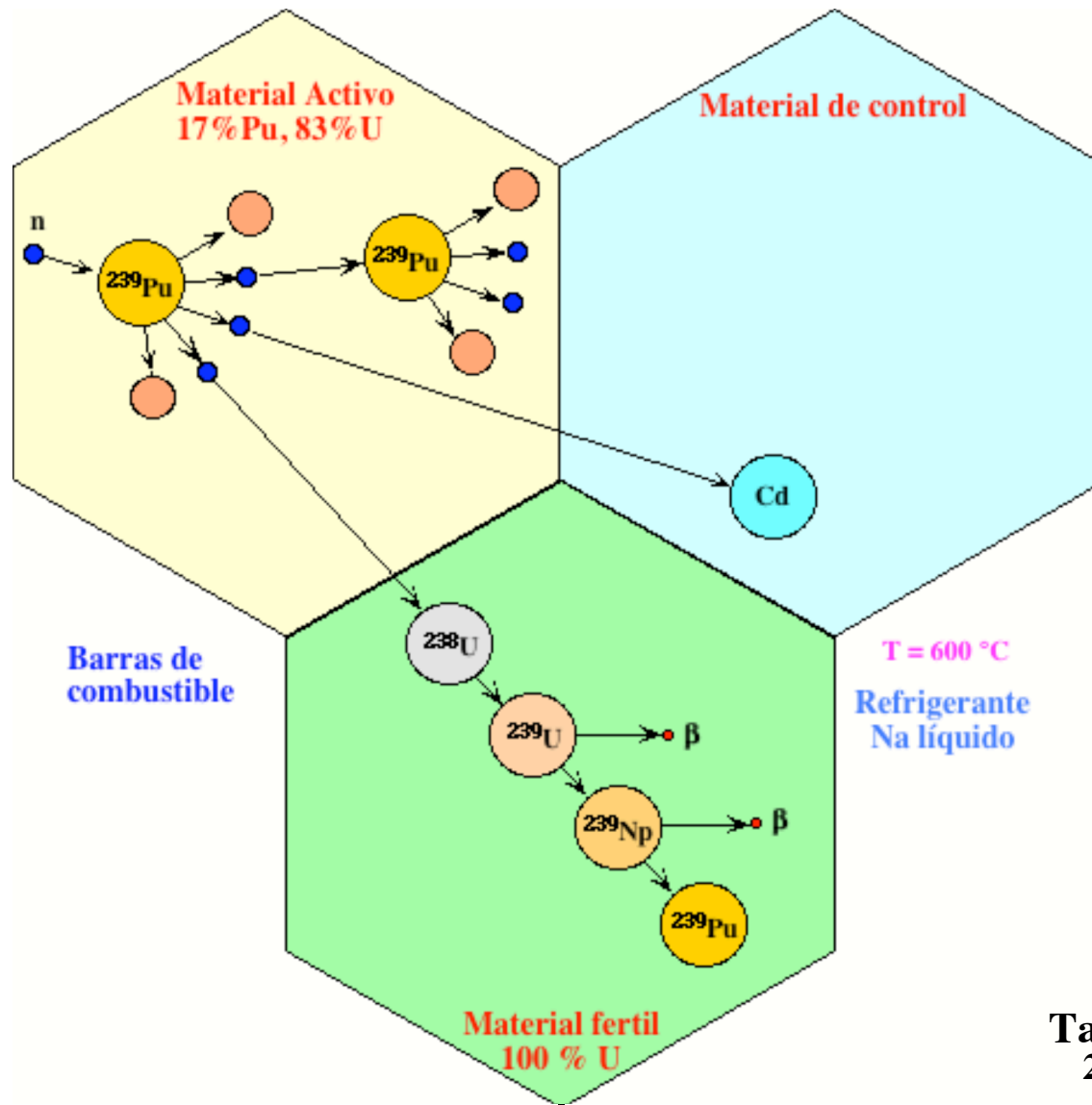
Reactor de agua presurizada (PWR)



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 (fértil)