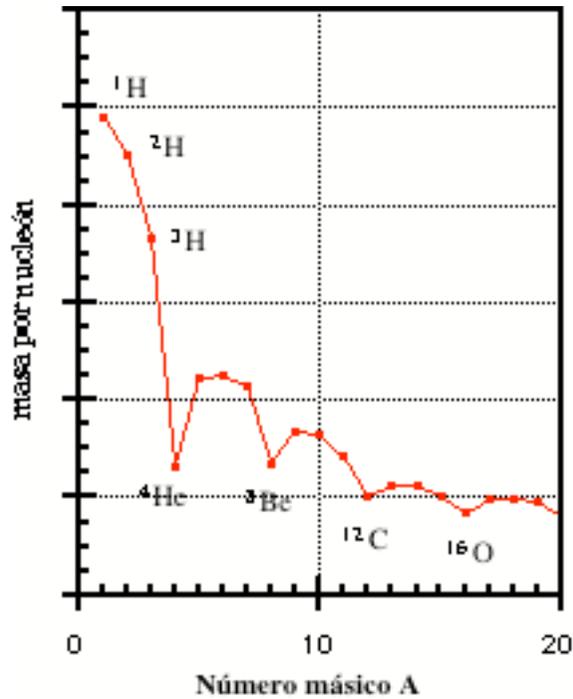




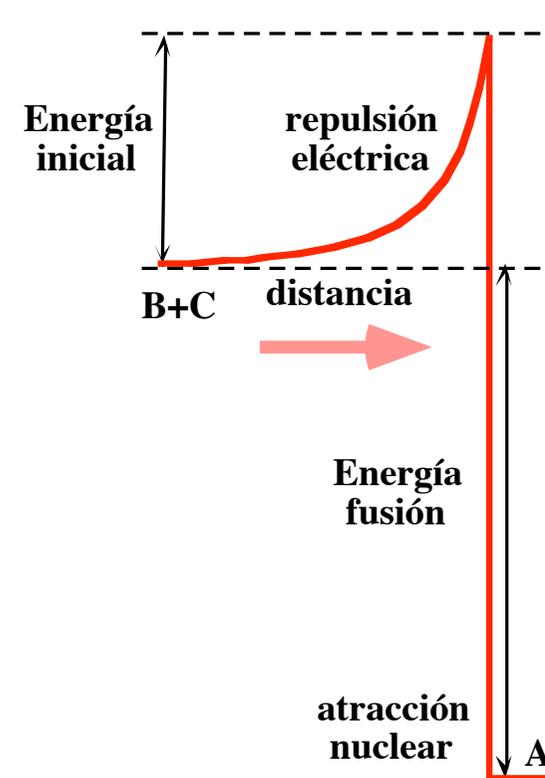
# *Física y Tecnología Energética*

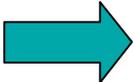
## **15 - Energía Nuclear de Fusión.**

# Energía en la Fusión Nuclear



Fusión  $B+C \rightarrow A$

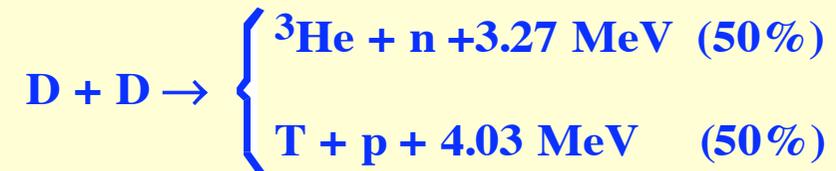
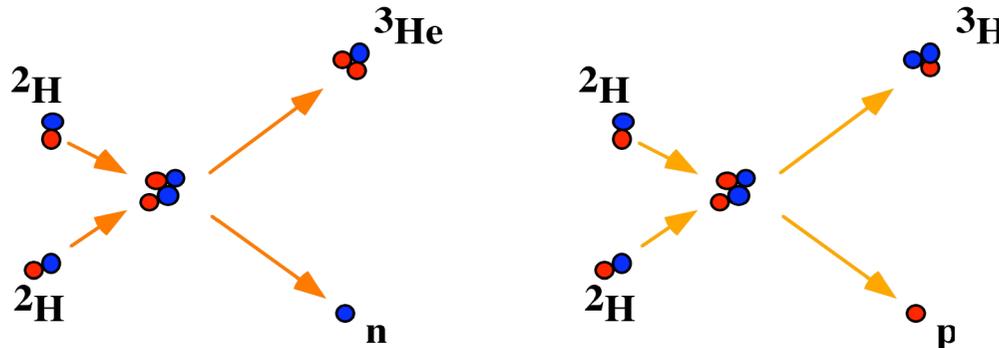


Fusión de núcleos pequeños  Disminución de masa

**Energía**

$$E = mc^2$$

# Reacciones de Fusión interesantes

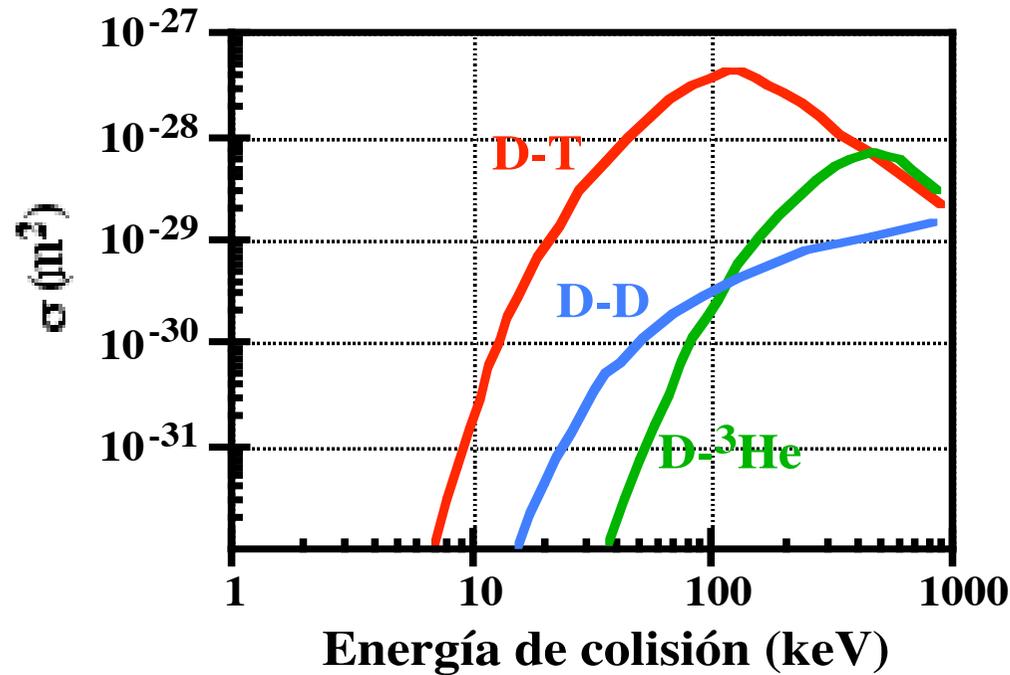


La fusión de 1g de D  $\rightarrow 4 \cdot 10^{11}$  J  $\approx 9.4$  g de U  $\approx 28$  Tm de C  
El Deuterio está presente en el agua de mar: 1 parte en 6 700.  
1 litro de agua  $\rightarrow 18$  mg de D  $\rightarrow 518$  kg de C  $\rightarrow 2000$  kW.h

# Reacciones de Fusión interesantes

*Para que ocurra la fusión hay que vencer la repulsión electrostática*

## Probabilidad para las Reacciones de Fusión



El T se puede obtener del Li (abundante)  $6Li + n \rightarrow 4He + T + 4.8 \text{ MeV}$

# Ciclos de combustible

- **D-D, D-T, D-<sup>3</sup>He**



*El D es muy abundante, no hay productos radiactivos*

- **D-T, Li**



El T se obtiene del Li ( abundante ) 7.4% <sup>6</sup>Li, 92.6% <sup>7</sup>Li



Hay que moderar el neutrón procedente de D-T y en suma



*Es la más fácil de conseguir*

- **Otras reacciones que podrían ser interesantes por la abundancia de combustible, pero son mucho más difíciles de producir**

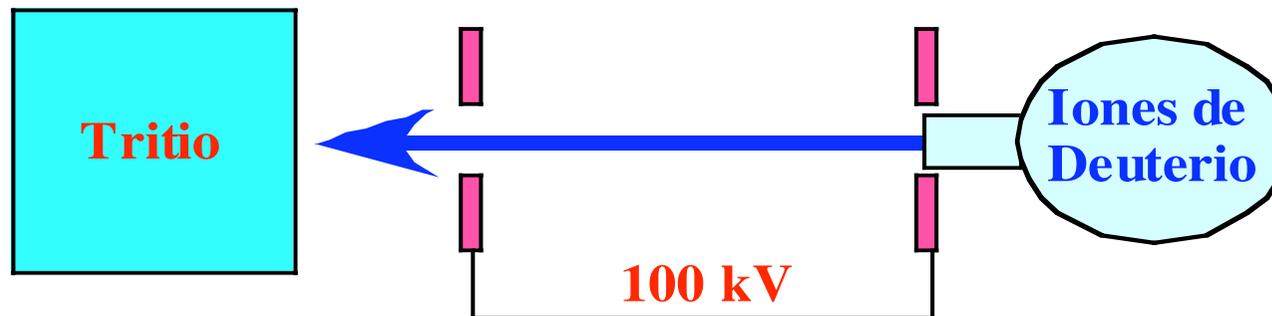


**Para empezar se escoge el ciclo D-T, Li  
cuando funcione se irán intentando los demás**

# La Fusión Nuclear no es fácil....

**Acelerando iones de Deuterio a 100 keV contra un blanco con Tritio en cada Fusión se obtienen 17.6 MeV**

*¿Podemos multiplicar la energía un factor 176 ?*



*No, la mayor parte de las colisiones son elásticas, los iones de D pierden energía y no son capaces de producir fusiones*

**Solo producirían fusiones uno de cada 1 000 en acelerar 1 000 iones se emplean 100 MeV, se producen 17.6 MeV**

# Fusion Termonuclear

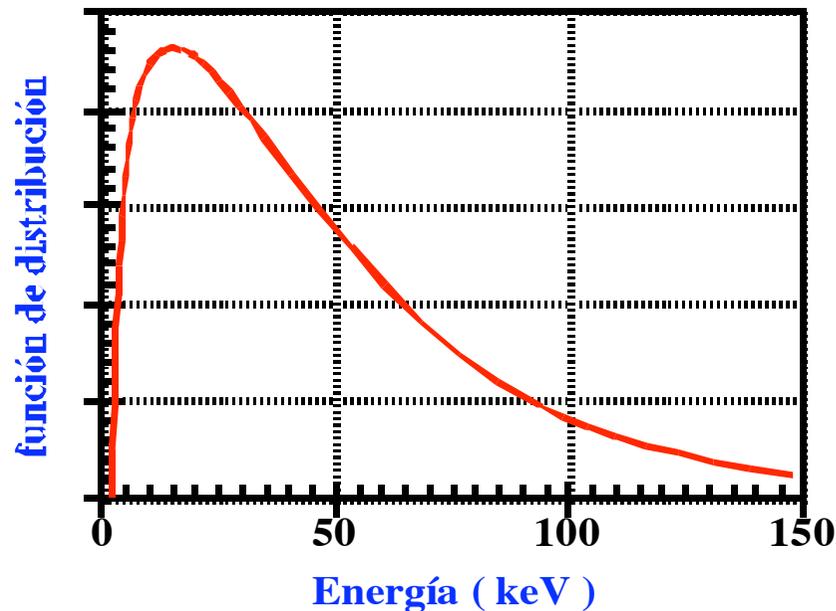
*Para que en las colisiones elásticas no pierdan energía  $\Rightarrow$   
colisiones aleatorias con iones de energía similar*

## Mezcla de Deuterio y Tritio

**mantenida a una temperatura muy elevada**

**$E \sim 10 - 100 \text{ keV}$      $T \sim 116 - 1\ 160 \text{ millones K}$**

**Distribución en energías para  $T = 200 \text{ MK}$**



*A estas temperaturas  
la materia está  
en estado de*

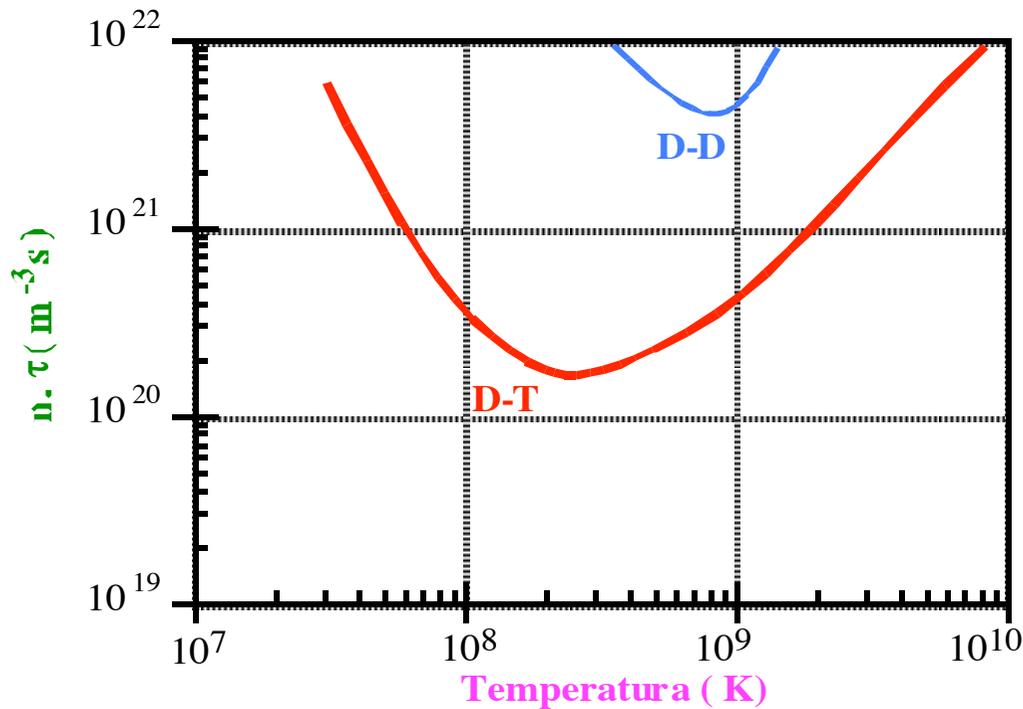
**PLASMA**

*No hay átomos neutros  
electrones y núcleos  
por separado*

# Criterio de Lawson

*Se debe producir más energía de Fusión que la que se emplee para mantener el plasma caliente.*

Producto  $n\tau$  (aire  $n \sim 10^{25}$  molec/m<sup>-3</sup>)



*Para producir energía neta de forma continua debemos mantener suficiente densidad  $n$  (D,T) a una temperatura elevada  $T$  durante suficiente tiempo  $\tau$  ( tiempo característico de pérdidas de energía por convección, conducción o radiación )*

$$\left( \frac{dE}{dt} \right) = - \frac{E}{\tau}$$

# Dos vías para la Fusión

Un plasma a esa temperatura no se puede contener en cualquier sitio

**Hay dos opciones:**

*\* Alta densidad y presión con tiempo muy pequeño.*

**Expansión libre → Confinamiento inercial**

( secreto militar )

*\* Baja densidad y presión con tiempo mayor.*

**Recipiente magnético → Confinamiento magnético**

( colaboración internacional )

# Fusión por confinamiento inercial

Si dejamos que una esfera de plasma de radio  $R$  a una temperatura  $T$  se expanda libremente, el tiempo de confinamiento será:

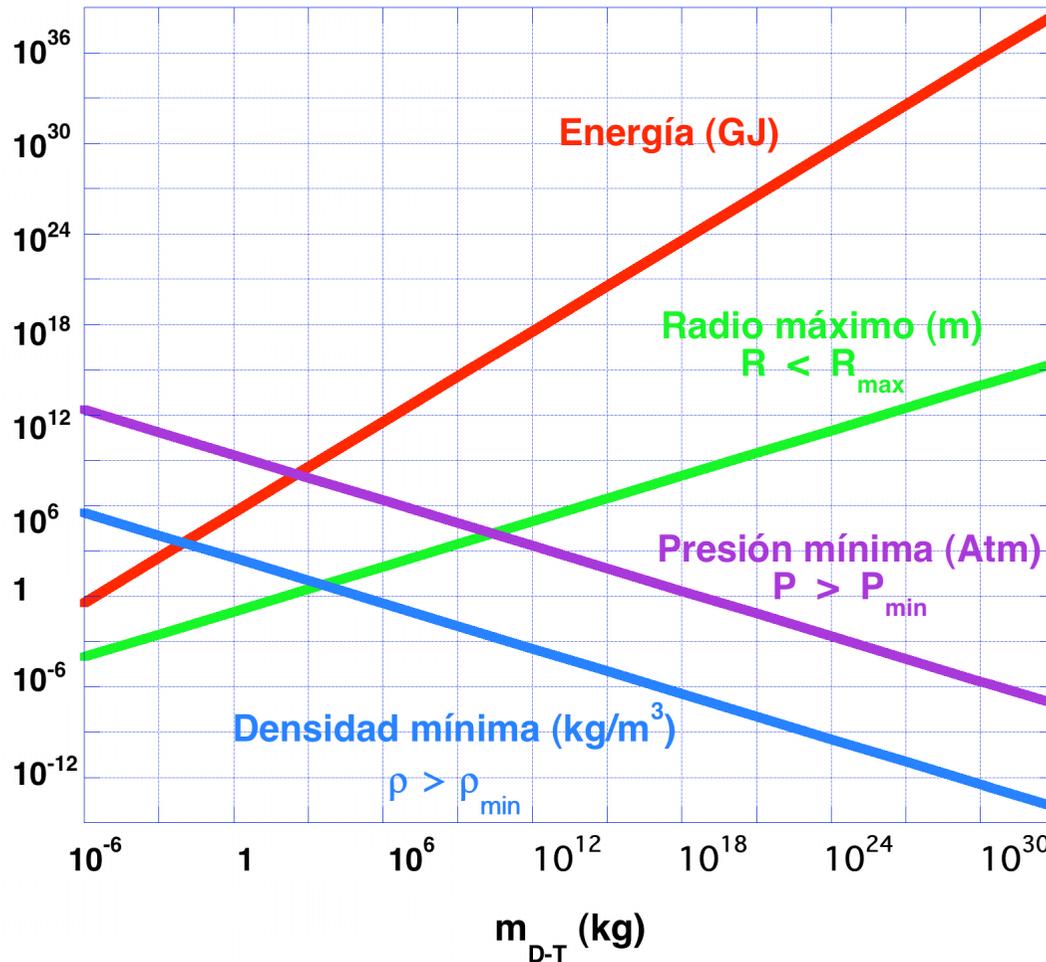
$$\tau = \frac{R}{V_s} \quad \text{Siendo } V_s(T) \text{ la velocidad del sonido}$$

**El criterio de Lawson se puede transformar**

$$n \cdot \tau > 1.5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \Rightarrow \rho \cdot R > 30 \text{ kg / m}^2$$

**para  $T \approx 200 \text{ MK}$**

# Condiciones para la Fusión por confinamiento inercial



$$m = \rho \frac{4}{3} \pi R^3 \quad \text{y} \quad \rho R > 30$$

Deuterio en condiciones normales,  
densidad =  $0,22 \text{ kg/m}^3$

Sol: Densidad =  $1409 \text{ kg/m}^3$   
Masa =  $1.99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ , Radio =  $6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$

Consumo energético anual:  
Mundo =  $5 \cdot 10^{11} \text{ GJ}$ , España =  $6 \cdot 10^9 \text{ GJ}$

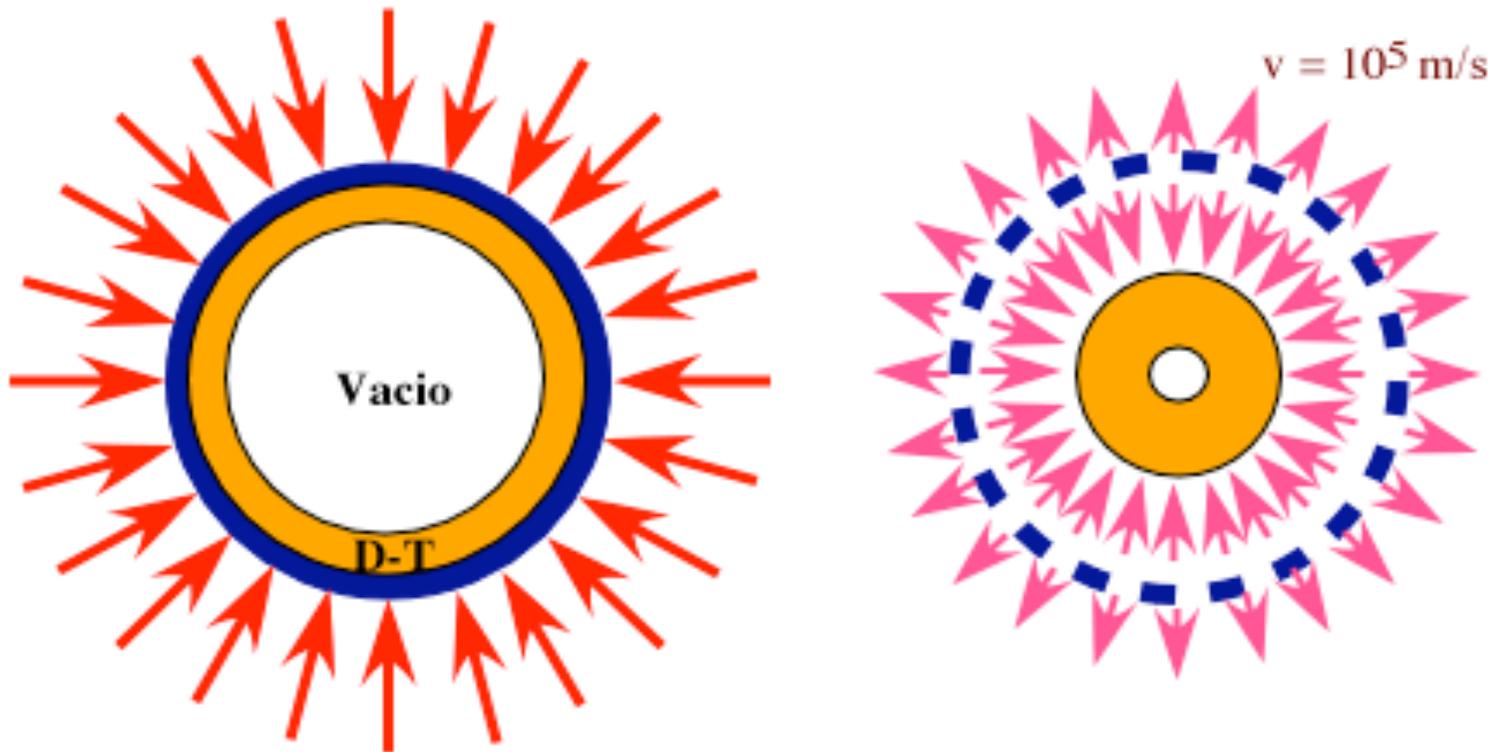
**En la bomba de Hidrógeno**  
(1 Mton TNT necesita 12kg D-T),  
la presión ( $> 3 \cdot 10^{10} \text{ atm}$ ) se consigue  
con la explosión de una bomba  
nuclear de Fisión

Para usos pacíficos necesitamos  
microexplosiones equivalentes a unos  
kg de TNT ( mg de D-T ) y por lo  
tanto presiones muy elevadas  
(  $> 10^{13} \text{ atm}$  )

# Confinamiento inercial

¿ Cómo conseguir someter una microbola de D-T a una presión de billones de atmósferas ?

Sobre una microbola de D-T recubierta de material pesado ( Ni, W, Mo ) se hacen incidir multitud de rayos láser o chorros de partículas



La cubierta se calienta y se evapora ( ablación ),  
por retroceso ( conservación cantidad de movimiento )  
se comprime la microbola

# Problemas del confinamiento

- La irradiación con numerosos haces láser debe ser totalmente uniforme.

*Todos los haces iguales, al mismo tiempo y perfectamente distribuidos.*

- Debe calentarse exclusivamente la cubierta exterior

*Si se calienta también el interior, se expande impidiendo la compresión*

La profundidad de la absorción de la radiación es proporcional a  $\lambda^2$

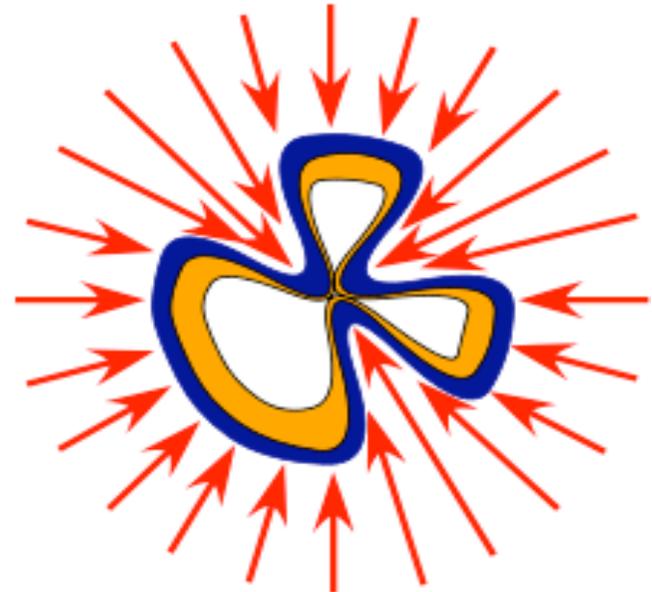
(  $\lambda$  longitud de onda , IR > 700 nm, visible 700-400 nm, UV < 400 nm )

*Será menor para  $\lambda$  menor ( rayos X )*

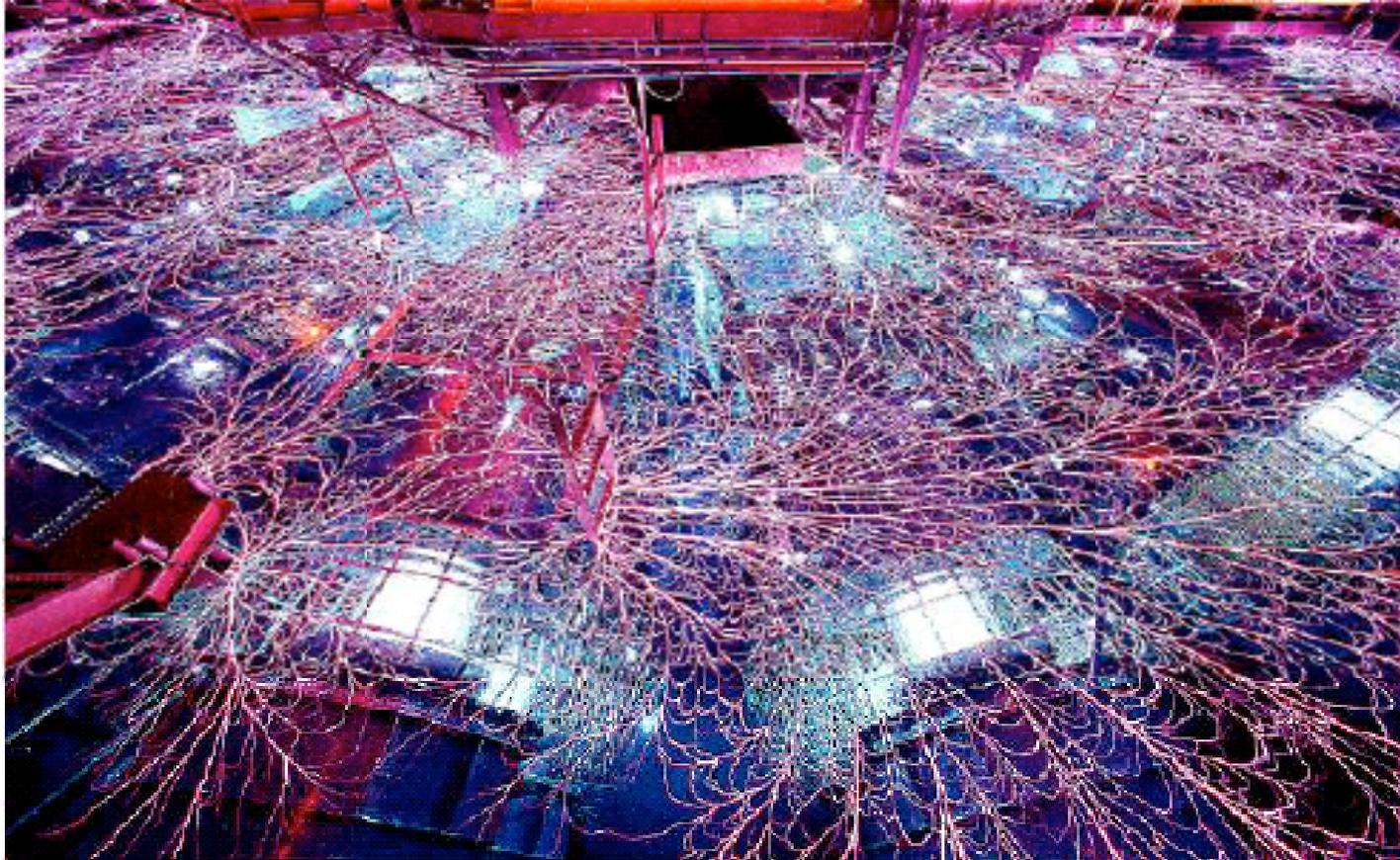
- El calentamiento debe tener lugar en un lapso de tiempo muy breve

*Para evitar la propagación de calor al interior y que sólo se transmita la compresión*

- La energía de los haces láser tiene que ser muy elevada

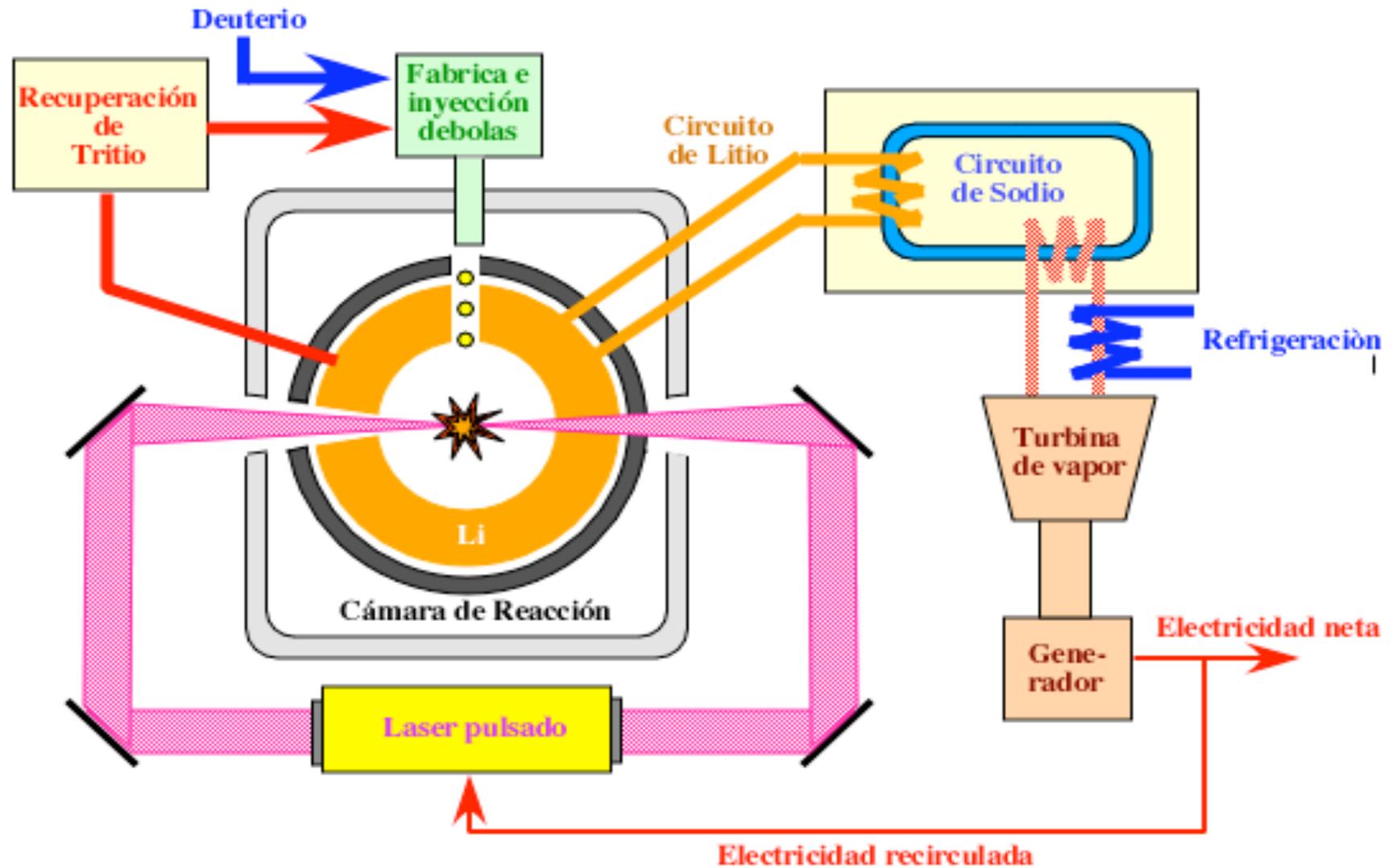


**En 2003 la Máquina Z en Sandia NL ( Albuquerque, NM, USA)  
consiguió 290 TW de rayos X durante 145  $\mu$ s, es decir 2MJ  
generando una temperatura en la cápsula de 1,6 MK**



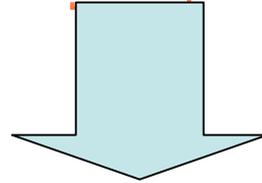
**Potentes impulsos eléctricos vaporizan una distribución de hilos metálicos generando multitud de descargas eléctricas gaseosas. Por efecto de constricción magnética estas descargas se comprimen y ceden toda su energía en forma de rayos X**

# Esquema de Reactor de Fusión Inercial



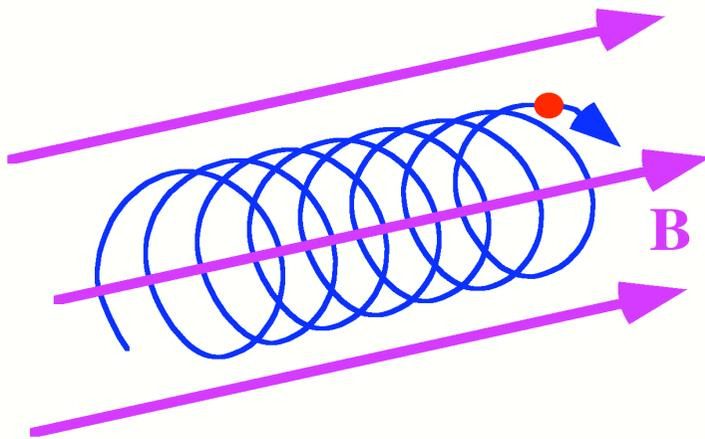
# Fusión por confinamiento magnético

*Un plasma a cientos de millones de grados  
no puede estar en contacto con una pared material*



**Confinarlo en una trampamagnética**

*Aunque el plasma es macroscópicamente neutro  
está compuesto de partículas cargadas*

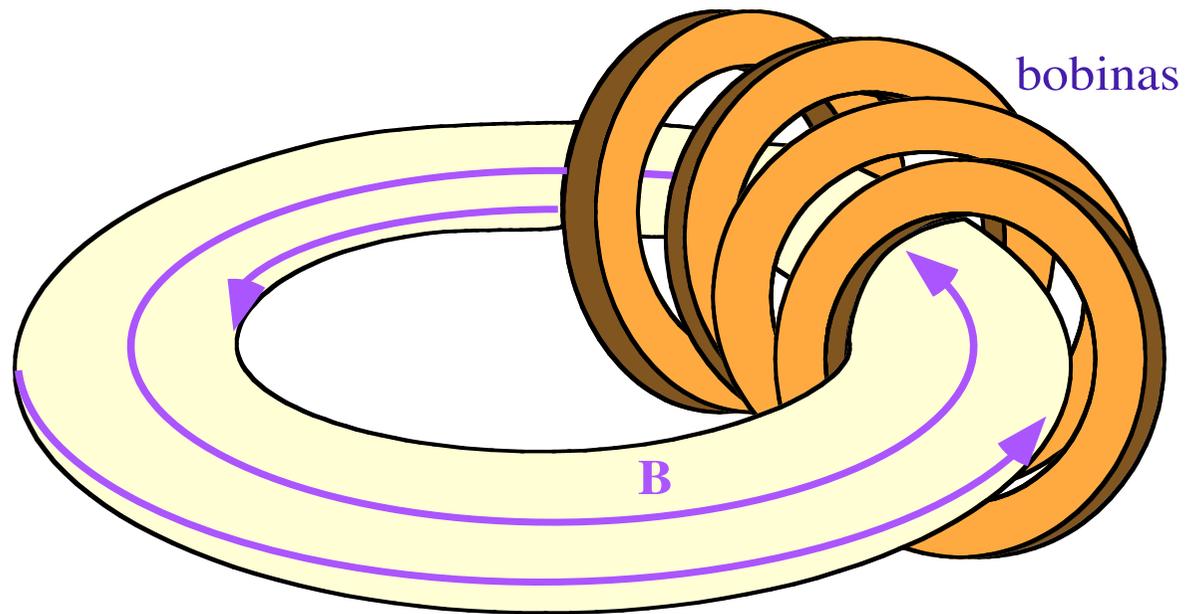


Las partículas cargadas  
en un campo magnético  
se mueven describiendo  
una hélice de radio

$$r_L = \frac{mv}{qB}$$

# Campo toroidal

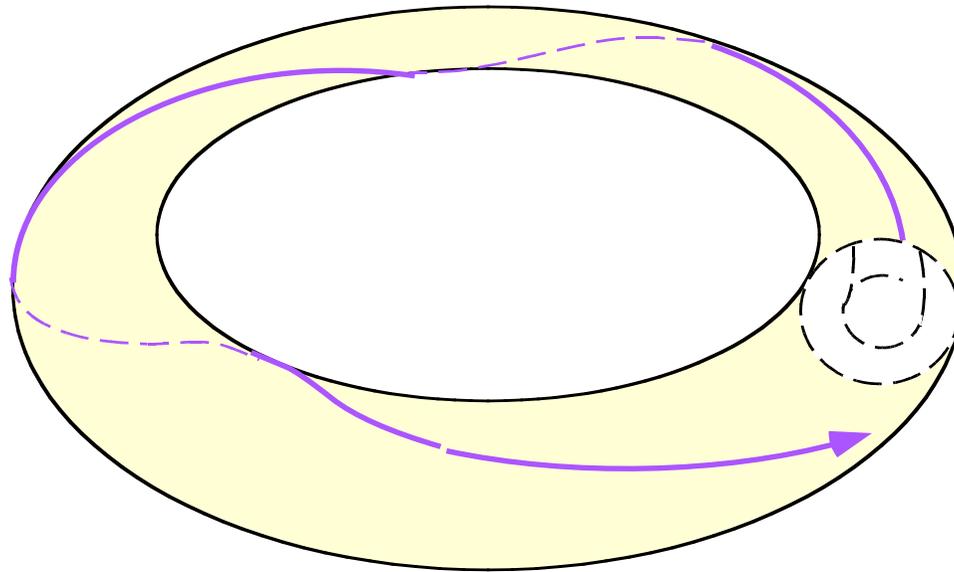
**Si las líneas de Campo Magnético están encerradas en un toroide el plasma no puede escapar.  
Sólo se pierde energía por emisión de radiación (ondas e.m. )**



# Superficies magnéticas

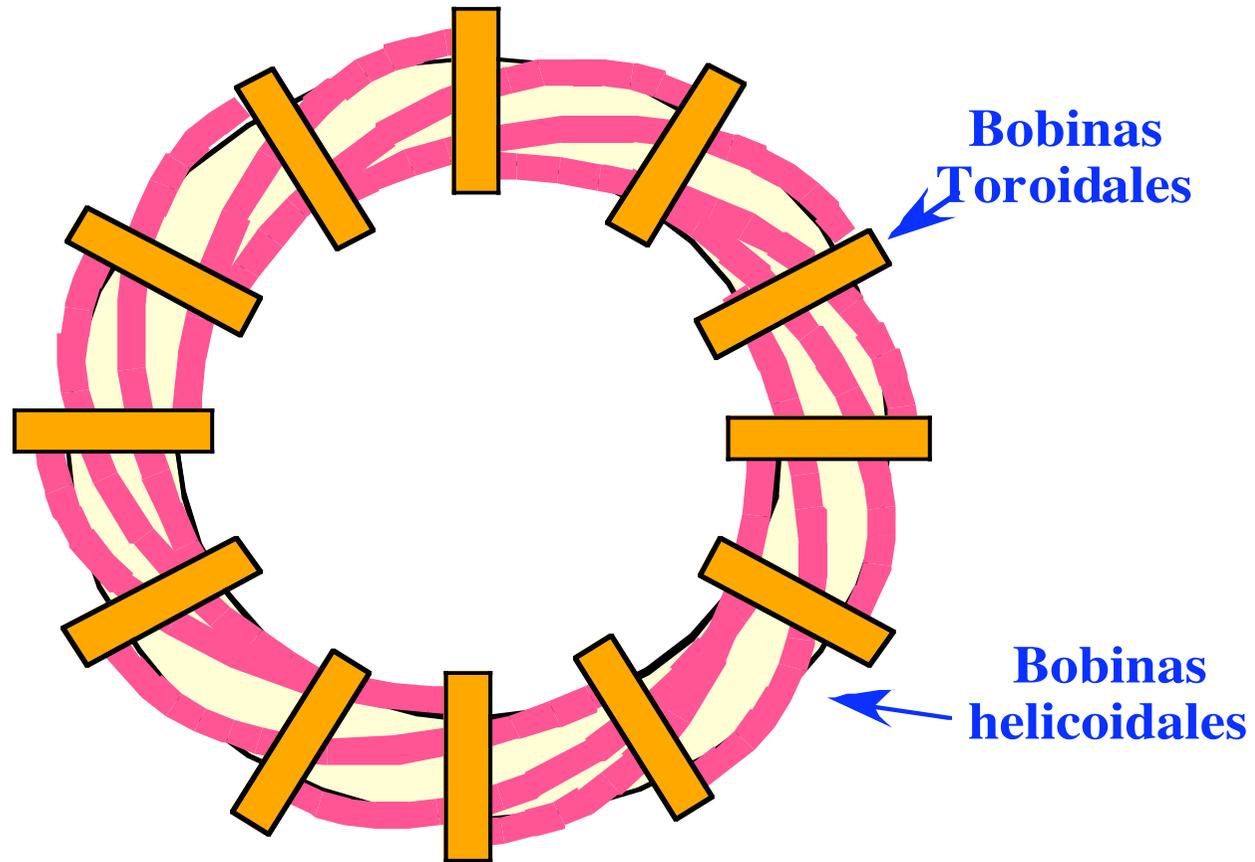
*Por razones de estabilidad, las líneas de campo deben tener una cierta inclinación, de forma que cada línea de campo va llenando una superficie magnética toroidal*

*Se crea un conjunto de superficies toroidales concéntricas*



# Stellarator

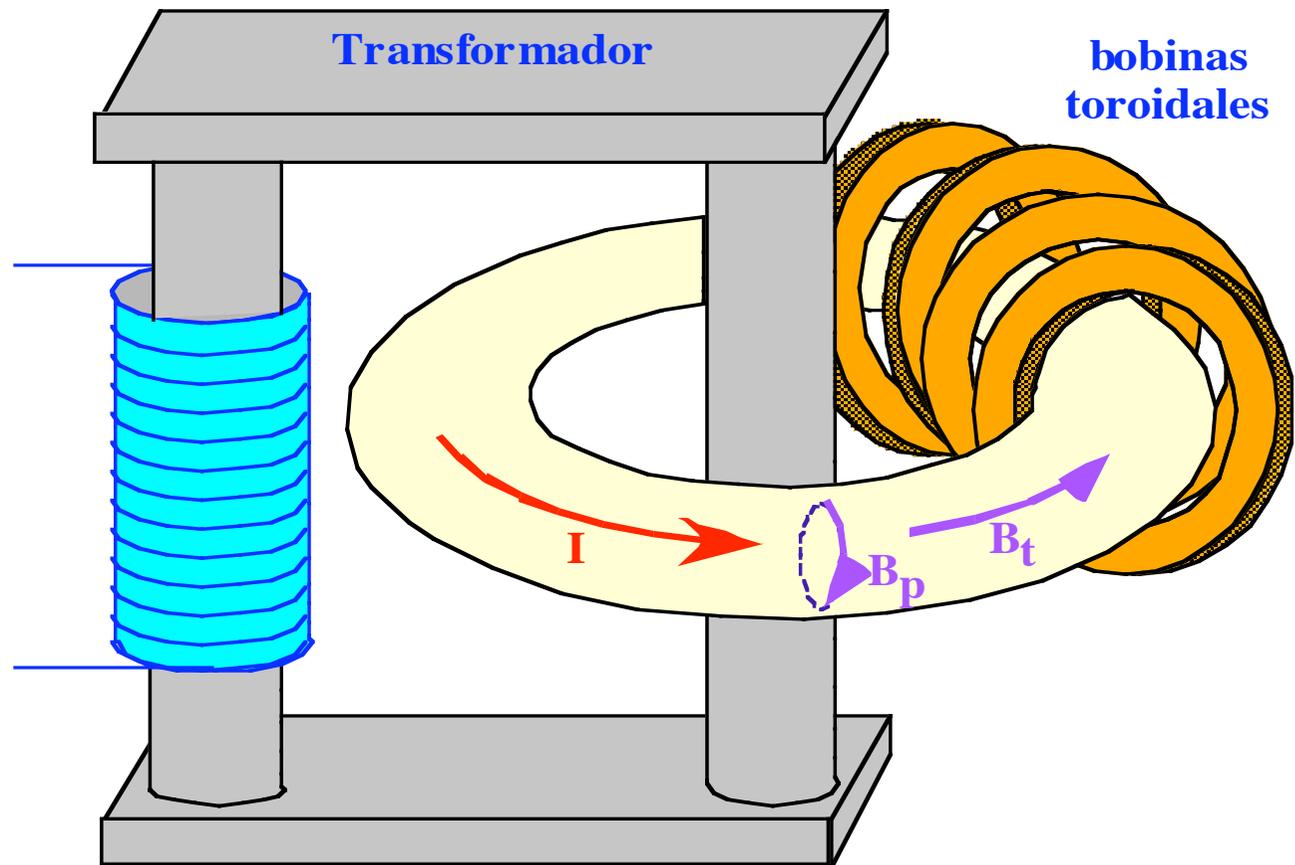
*Las líneas de campo helicoidales formando superficies magnéticas se consiguen con bobinas helicoidales*



# Tokamak

*Las líneas de campo helicoidales formando superficies magnéticas se consiguen haciendo circular corriente en el plasma*

*Variando la corriente en el primario del transformador se induce una corriente  $I$  en el plasma que actúa como secundario. Esta corriente genera un campo poloidal  $B_p$  que combinado con el toroidal  $B_t$  forman el campo helicoidal*



# Pérdidas de energía en el plasma

En un Tokamak con  $B = 1$  Tesla,  $R_{\text{mayor}} = 3$  m,  $R_{\text{menor}} = 1$  m,  $n = 10^{20} \text{m}^{-3}$

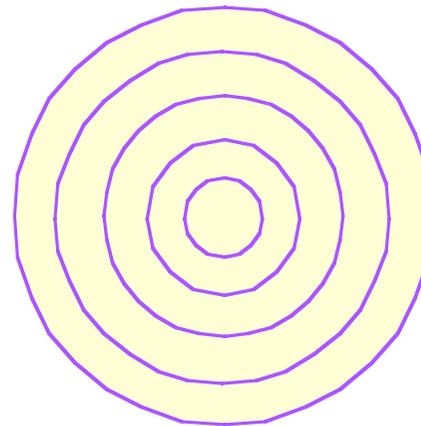
Tiempos de confinamiento ( $n\tau > 10^{20} \text{m}^{-3}\text{s}$ )

- expansión libre  $\tau = 10^{-6}$  s      - teórico  $\tau = 10^3$  s      - experimental  $\tau = 0.2$  s

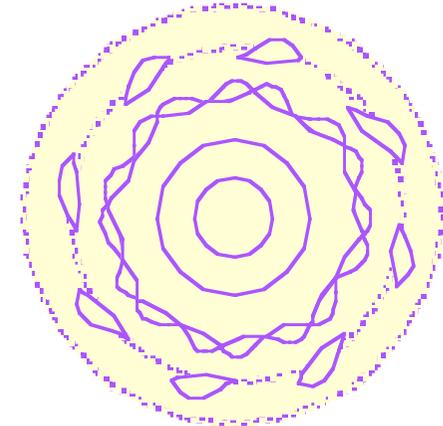
*El campo magnético retarda bastante las pérdidas de partículas y energía pero no tanto como se esperaba teóricamente.*

*Con los valores experimentales necesitamos tamaños y campos grandes*

Superficies magnéticas



Ideales



Reales

La discrepancia teoría-experimento se piensa que es debida a **Turbulencia electromagnética**

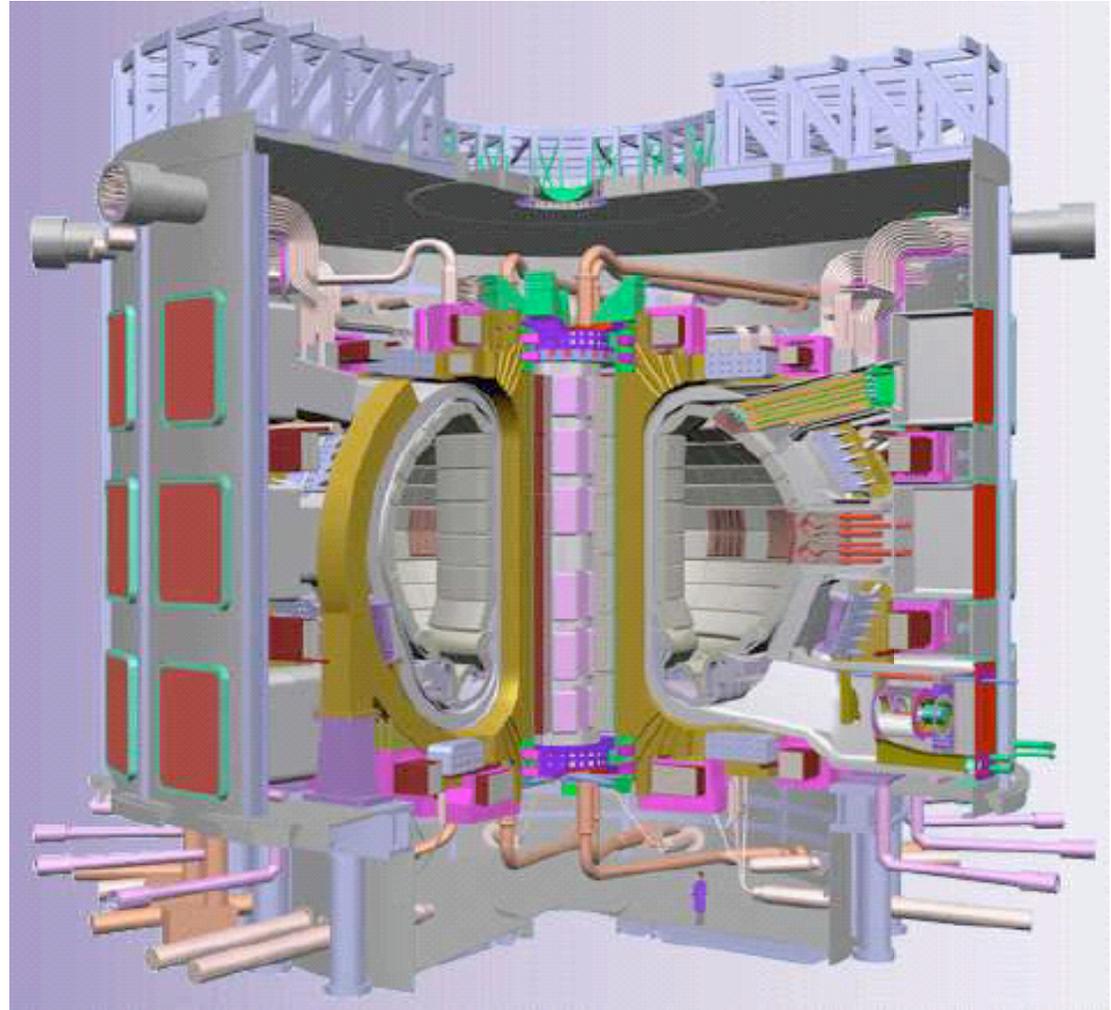
# Proyecto ITER

En 1991 el tokamak europeo JET consiguió Efusión = Ecalentamiento

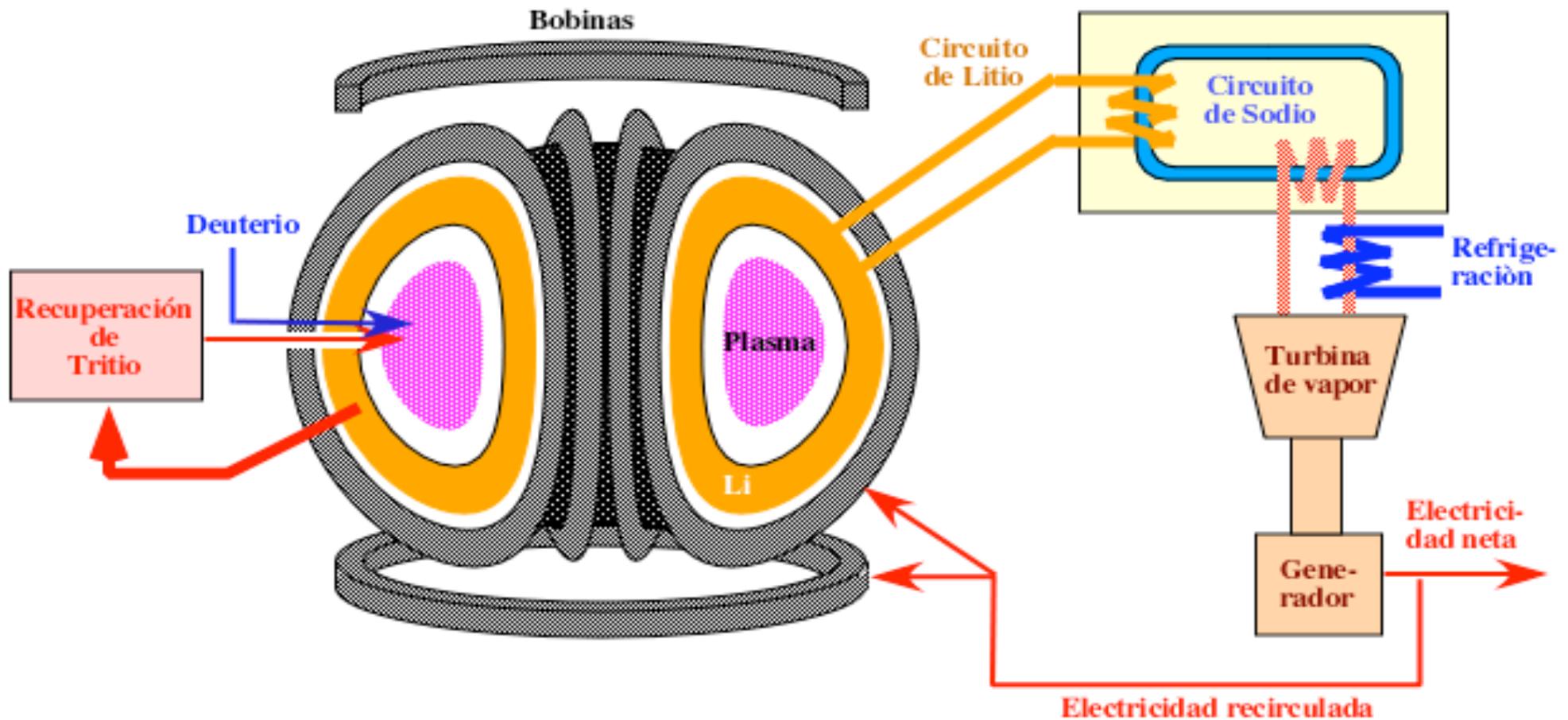
Desde 1992 Colaboración internacional UE, USA, Japón, Rusia. Se unen Australia, Canada, China...

En 2005 se decidió construirlo en Caradache (Francia)

Construcción	360 M\$/año	
durante 9 años	-	3340 M\$
Operación	188 M\$/año	
durante 20 años	-	3760 M\$
Desmantelamiento		335 M\$
<b>Total</b>		<b>7435 M\$</b>



# Esquema de Reactor de Fusión Magnético



# Energía Nuclear de Fisión y Fusión

*Reservas, si tuvieran que satisfacer toda la demanda mundial*

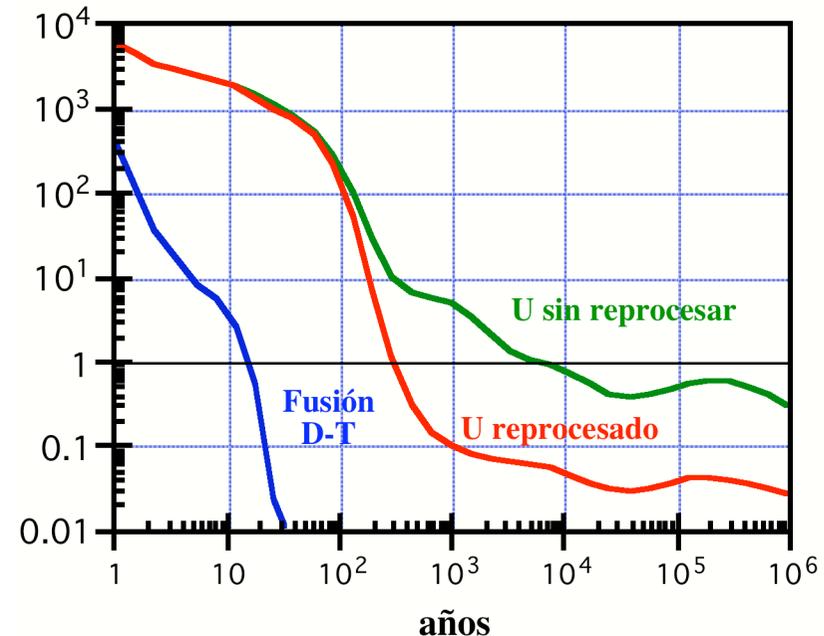
$^{235}\text{U}$	30 años
$^{239}\text{P}$ - $^{238}\text{U}$	2 000 años
$^{233}\text{U}$ - $^{232}\text{Th}$	10 000 años
D-T, Li rocas	30 000 años
D-T, Li mar	30 millones de años
D-D	400 000 millones de años

## Riesgos

*En la fisión puede perderse el control de la reacción dando lugar a accidentes graves*

*En la fusión es imposible*

**Peligrosidad relativa de los residuos**



# Energía de Fusión Termonuclear

## \* Seguridad Intrínseca

*-Los reactores de fusión no funcionan solos.*

*-Las cantidades de D-T son muy pequeñas.*

*-La máxima potencia de explosión está acotada por el tamaño de las microbolas en c. inercial*

## \* Impacto medioambiental

*-El Tritio tiene vida media corta (12.3 años ) y las cantidades son pequeñas. Consumo previsible de 1kg / día en una central de 1000 MW*

*-Si el T se genera en la propia planta se reduce el riesgo.*

*-El material del blindaje se puede activar por absorción de neutrones. Se generan residuos radiactivos, pero podrían ser de baja actividad e inocuos a los 10-50 años.*

# Energía de Fusión Termonuclear

## \* **Rentabilidad Económica.**

- *Tanto las bobinas de campo magnético intenso (superconductoras) como los láseres y aceleradores son muy caros.*
- *La primera pared recibe un alto daño por irradiación con rayos X, iones neutrones,...ect. Hay que reponerla frecuentemente.*
- *Además tiene que soportar mecánicamente la explosión en c.inercial*
- *Actualmente funciona de forma pulsada tanto el c.inercial como el Tokamak. El daño a materiales es mayor y la eficiencia térmica menor.*
- *La potencia es proporcional al volumen y el coste a la superficie. Un reactor enorme puede ser competitivo.*

## \* **¿ Es Técnicamente posible ?**

- *El c.magnético ha demostrado que puede funcionar, el c.inercial todavía tiene que demostrar que funciona.*
- *Son necesarias serias mejoras. Actualmente el ciclo D-D no es posible*
- *Si funciona lo básico, aún hay que desarrollar todo lo demás: Materiales, como aprovechar la energía de los neutrones, como introducir el D-T de forma continua,.....etc*