

Basado en el curso dictado por Prof. J.L. Schwob
The Hebrew University of Jerusalem, Israel.

Programa del Curso

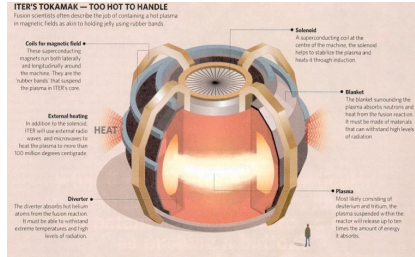
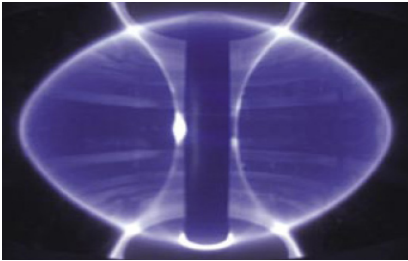
1. Física de Plasmas: Conceptos Generales
2. **Fusión Termonuclear Controlada**
3. Equilibrio Termodinámico
4. Procesos fundamentales en Física Atómica
5. Plasmas fuera del equilibrio termodinámico
6. Modelo Coronal
7. Modelo Colisional–Radiativo
8. Diagnóstico de Plasmas

Programa del Curso

2. Fusión Termonuclear Controlada

- ▶ El problema energético mundial
- ▶ Reacciones nucleares de fusión
- ▶ Plasmas de laboratorio
- ▶ Criterios de ignición

2. Fusión Termonuclear Controlada



Actualización

Viernes, 24 de Enero de 2014

ECONOMÍA

Con 47° de térmica, se marcó otro récord energético

En medio de la ola de calor

El Gobierno nacional informó que este jueves se registró otro récord energético para un día hábil, como consecuencia de las altas temperaturas que alcanzaron una sensación térmica histórica para el mes de enero de hasta 47 grados centígrados.

Según reveló el Ministerio de Planificación Federal, a cargo de Julio De Vido, el Sistema Argentino de Interconexión batió un nuevo record de energía total entregada para un día hábil al alcanzar 507,6 GWh. Esa marca superó el registro anterior de 503,6 GWh, correspondiente al 17 de enero.

El comunicado recordó que el lunes pasado a las 15.05 se logró otro nuevo récord de demanda de potencia para un día hábil al llegar a 24.034 megavatios, que sobrepasó la marca de 23.978 megavatios del mismo viernes 17 a las 14.20 horas. Ese elevado nivel consumo también se debió a la ola de calor, que todavía afecta gran parte del país y -según Planificación- por el mayor nivel de actividad económica.



El problema energético mundial

Según Wolfram Alpha (estimación 2010):

- ▶ Consumo total en **Argentina**:
 3.533×10^{18} J/Yr
- ▶ $1 \text{ J/Yr} = 3.17 \times 10^{-8} \text{ W}$
- ▶ $112 \text{ GW} = 0.112 \text{ TW} = 1.12 \times 10^{11} \text{ W}$

Gas Natural	1.8×10^{18} J/Yr
Petróleo	1.2×10^{18} J/Yr
Renovables	3.6×10^{17} J/Yr
Nuclear	7.3×10^{16} J/Yr
Carbón	6.8×10^{16} J/Yr

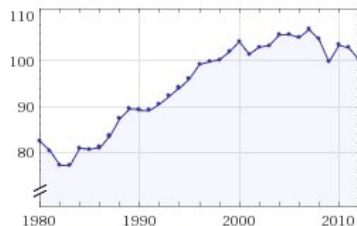


El problema energético mundial

Según Wolfram Alpha (estimación 2012):

- ▶ Consumo total en **EEUU**:
 $1.003 \times 10^{20} \text{ J/Yr} = 3.182 \times 10^{12} \text{ W}$

Petróleo	$4.3 \times 10^{19} \text{ J/Yr}$
Gas Natural	$2.8 \times 10^{19} \text{ J/Yr}$
Carbón	$1.8 \times 10^{19} \text{ J/Yr}$
Nuclear	$8.5 \times 10^{18} \text{ J/Yr}$
Renovables	$5.4 \times 10^{18} \text{ J/Yr}$

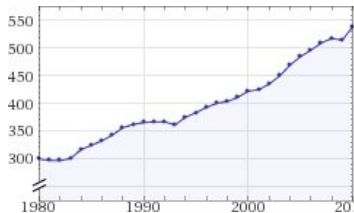


El problema energético mundial

Según Wolfram Alpha (estimación 2010):

- ▶ Consumo total en **el mundo**:
 $5.387 \times 10^{20} \text{ J/Yr} = 1.708 \times 10^{13} \text{ W}$
- ▶ En 1985 el consumo anual fue de 290 ExaJ (EJ = 10^{18} J). Se preveía para el 2025 un consumo de 580 EJ.

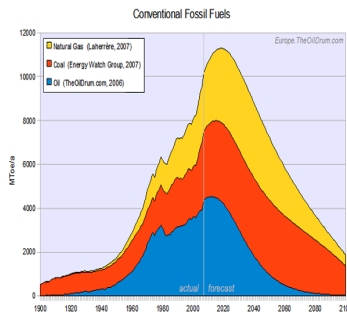
Petróleo	$1.8 \times 10^{20} \text{ J/Yr}$
Carbón	$1.6 \times 10^{20} \text{ J/Yr}$
Gas Natural	$1.3 \times 10^{20} \text{ J/Yr}$
Renovables	$4.3 \times 10^{19} \text{ J/Yr}$
Nuclear	$2.6 \times 10^{19} \text{ J/Yr}$



El problema energético mundial

Recursos:

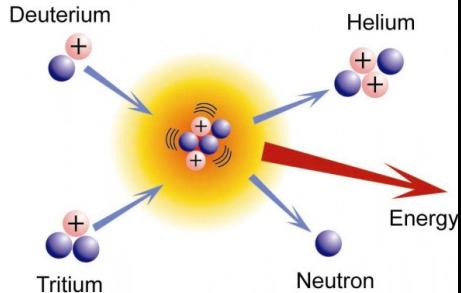
- ▶ **Energía Fósil:** Se estima que las reservas son 4×10^{15} kWh
- ▶ **Energía Solar:** La energía que llega a la Tierra es 10^{18} kWh (10^{11} MW). Aún suponiendo una alta eficiencia de conversión, se deberían cubrir cientos de miles de km^2 para sostener la demanda energética.
- ▶ **Energía Nuclear:**
 1. **Fisión:** Recursos estimados $\approx 10^{25}$ kWh (Ilimitado!) (Peligroso!)
 2. **Fusión:** Solución !!



Fusión

Ventajas:

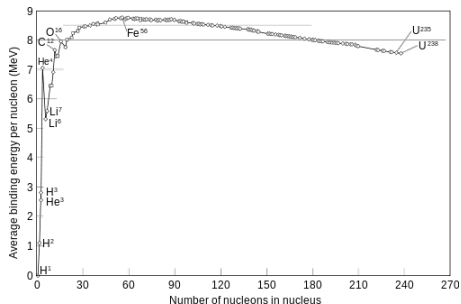
- ▶ Abundancia natural del Deuterio: $\frac{n_D}{n_H} = \frac{1}{5000}$
- ▶ Recursos ilimitados: 10^{25} kWh
- ▶ No tiene desechos peligrosos
- ▶ Recursos distribuídos equitativamente en el mundo
- ▶ **Funciona!**



Reacciones de Fusión Nuclear

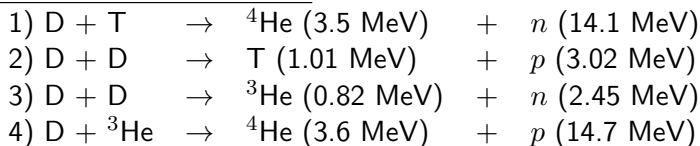
- ▶ Los núcleos más estables tienen un $A \approx 60$ (${}^{62}\text{Ni}$)
- ▶ La energía de ligadura se puede liberar en dos formas:
 1. Fisionando un núcleo pesado (parte derecha de la curva)
 2. Fusionando dos núcleos livianos

Energía Nuclear de Ligadura:

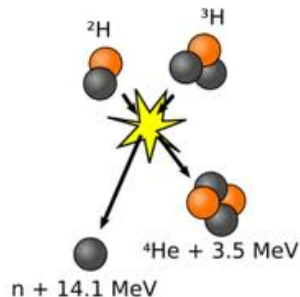


Reacciones de Fusión Nuclear

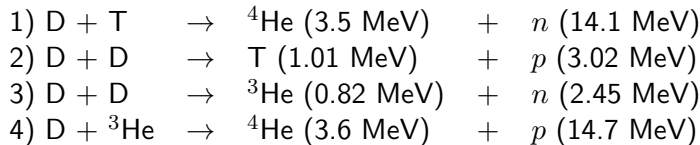
Reacciones más relevantes:



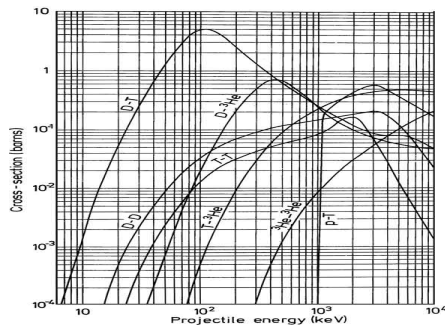
- ▶ Debido a la repulsión electrostática entre los núcleos, se requiere una gran energía cinética para sobreponerse a la barrera de potencial
- ▶ Esto significa temperaturas muy altas, del orden de 10 keV ($10^4 \times 10^4 = 10^8$ K !!)



D–D vs. D–T



- ▶ La reacción D–T es más probable
- ▶ Ocurre a menor temperatura $kT_e > 5$ keV
- ▶ Los neutrones resultantes son muy energéticos
- ▶ La separación isotópica del D es sencilla
- ▶ El D se extrae del mar y el ${}^4\text{He}$ no es radioactivo

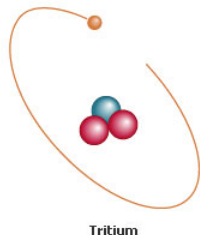


Tritio

- ▶ Consiste en 3 nucleones, pero sólo uno de ellos cargado
- ▶ Si bien es un isótopo del H, su abundancia natural es ínfima
- ▶ Es **radioactivo** (Se desintegra en ${}^3\text{He}^+$ en 12.3 años)
- ▶ Un único test en JET (1989) requirió manejo remoto por un año
- ▶ Se produce por

$${}^6\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + {}^4\text{He} \quad (\text{exotérmica})$$

$${}^7\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + {}^4\text{He} + n \quad (\text{no consume } n)$$
- ▶ Li: \$US 3000 la tonelada. Bolivia–Chile–Argentina conforma el *triángulo del Li*, con 85% de las reservas mundiales



Tritium

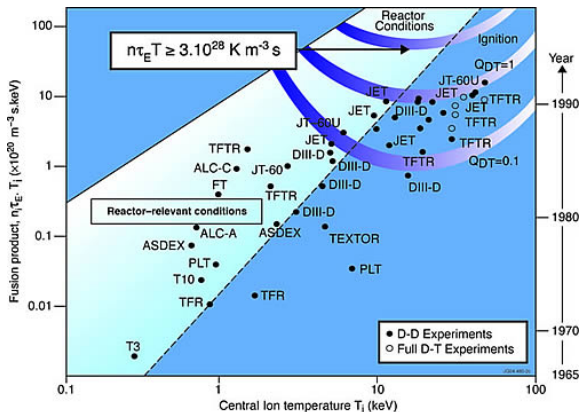


Criterio de Lawson

- ▶ AERE Report, desclasificado en 1957
- ▶ Temperatura mínima
 $T > 3 \times 10^7$ K
- ▶ Mínimo $n\tau > 10^{14}$ cm⁻³s



Criterio de Lawson



“Producto de Fusión”:

$$n \tau T > 10^{28} \text{ m}^{-3} \text{ s K}$$

$$n \tau T > 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ s KeV}$$

Criterio de Lawson

- ▶ Potencia de Fusión: $P_{fus} = P_{\alpha} + P_n$
- ▶ Potencia de Pérdidas P_{loss} : Bremsstrahlung, transporte, radiación de impurezas (Z^4 !!)
- ▶ Potencia exterior P_{ext} : Calentamiento externo para compensar las pérdidas
- ▶

$$\frac{\partial W}{\partial t} = P_{\alpha} + P_{ext} - P_{loss}$$

- ▶ Factor de amplificación: $Q \equiv \frac{P_{fus}}{P_{ext}}$
- ▶ Breakeven: $Q = 1$
- ▶ Ignición: $P_{\alpha} = P_{loss} \Rightarrow Q = \infty$

Criterio de Lawson

Derivación (formalmente en la práctica):

- ▶ Tiempo de confinamiento: $\tau = \frac{W}{P_{loss}}$
- ▶ Para reacción D-T: $n_D = n_T \equiv \frac{1}{2}n$
- ▶ Número de reacciones: $f = n_D n_T \langle \sigma v \rangle = \frac{n^2}{4} \langle \sigma v \rangle$
- ▶ Potencia de Pérdidas: $P_{loss} = 3n kT$
- ▶ Se requiere: $f E_\alpha \geq 3n \frac{kT}{\tau}$
- ▶ Lo que lleva a: $n\tau \geq \frac{12}{E_\alpha} \frac{kT}{\langle \sigma v \rangle}$

Abordaje Experimental: Máquinas de Plasma

Se deben resolver dos problemas fundamentales:

1. **Calentamiento del Plasma:** Crear y calentar el plasma D–T hasta las condiciones de ignición
2. **Confinamiento del Plasma:** Contener el plasma en las condiciones del criterio de Lawson. Ningún material puede mantenerse sólido en 5000 K

Existen otros problemas: Pérdidas por radiación, Inestabilidades, Deterioro, Contaminación, etc. . . .

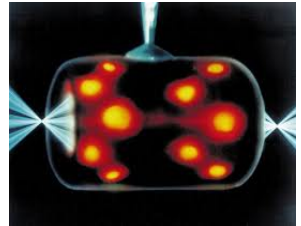
Máquinas de Plasma

Existen dos abordajes con grandes probabilidades de éxito:

▶ **Confinamiento Magnético**



▶ **Confinamiento Inercial**



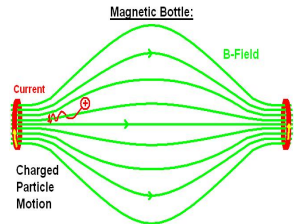
Confinamiento Magnético

- ▶ El plasma se compone de partículas cargadas
- ▶ La trayectoria de estas son hélices alrededor de las líneas del campo magnético
- ▶ La presión magnética debe balancear la presión cinética del plasma

Máquinas de Plasma

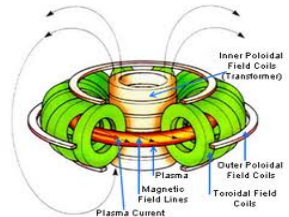
Existen dos configuraciones:

► Máquinas Abiertas



► Máquinas Cerradas

Z-pinch, Stellarator, Torsatron,
Tokamak



Confinamiento Magnético

Fuerza de Lorentz:

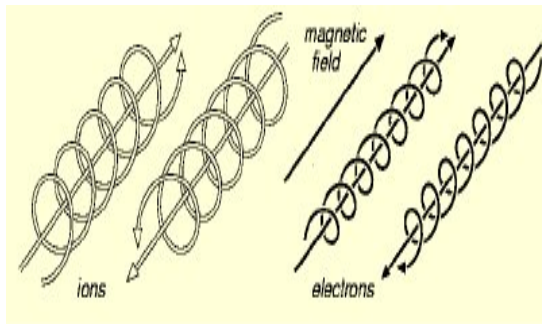
$$F_L = q(v \times \mathbf{B})$$

Radio de Larmor:

$$r_L = \frac{mv_{\perp}}{qB}$$

Frecuencia de ciclotrón:

$$\omega_c = \frac{v_{\perp}}{r_L} = \frac{qB}{m}$$

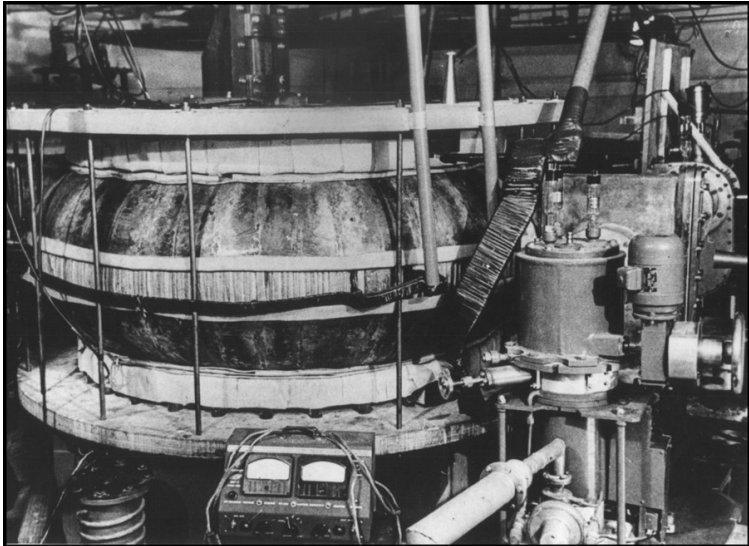


A temperaturas de fusión:

$$r_p \approx 1 \text{ cm} \quad r_e \approx 0.2 \text{ mm}$$

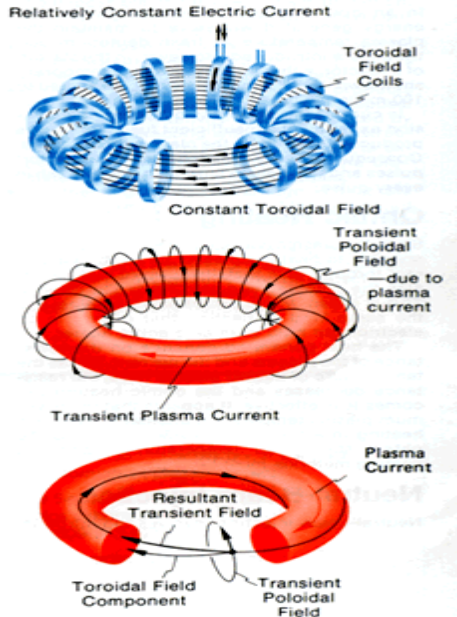
Para confinar a un $t = \frac{L}{v_{\parallel}} = 1 \text{ s}$,
 $L > 1000 \text{ km}$

El Tokamak (URSS 1950)



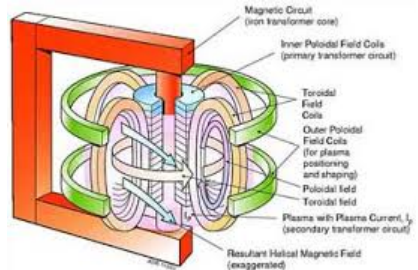
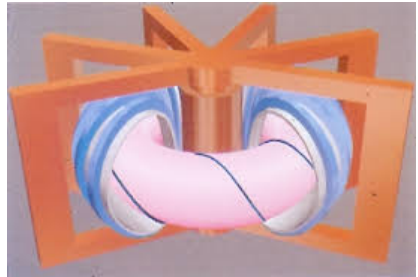
Tokamaks

- ▶ Campo Toroidal: confina y estabiliza el plasma
- ▶ Campo Poloidal: generado por el plasma
- ▶ $B_t \gg B_p$



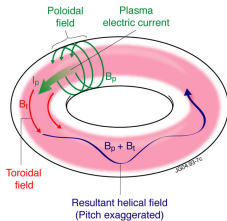
¿Cómo se origina la corriente?

- ▶ El plasma no tiene extremos, no se puede generar una diferencia de potencial
- ▶ Se utiliza el principio de inducción de Faraday
- ▶ El transformador tiene dos bobinas enrolladas en un núcleo común
- ▶ En este caso el primario está enrollado en el interior del toroide, y el secundario lo constituye el mismo plasma

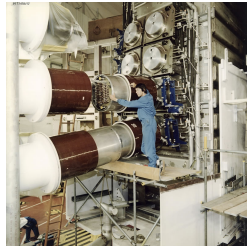
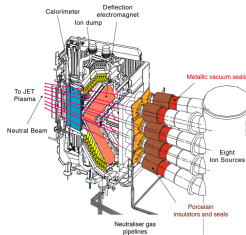


Calentamiento del Plasma

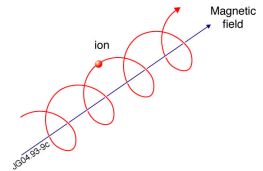
Calentamiento
Ohmico:



Inyección neutral:

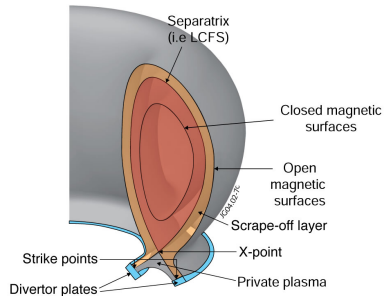
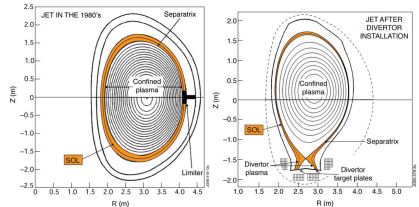


Resonancia
ciclotrónica:

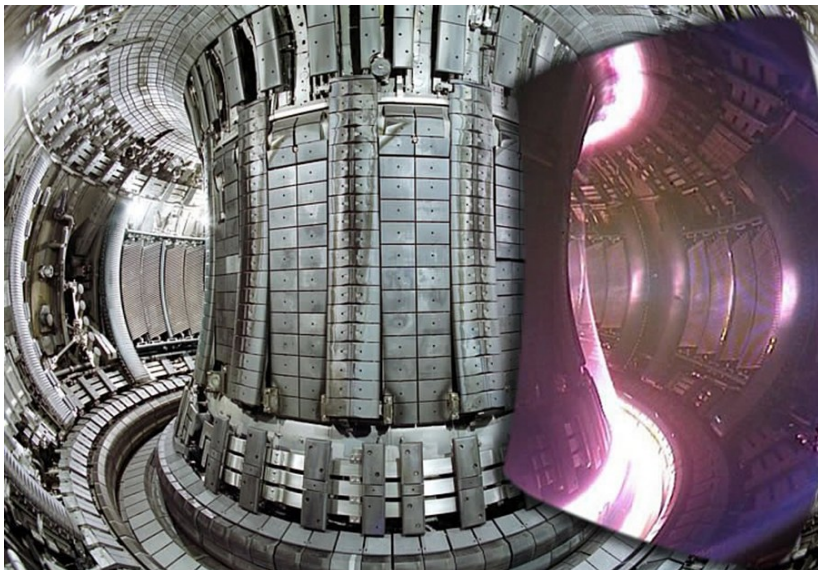


Limitadores y Divertor

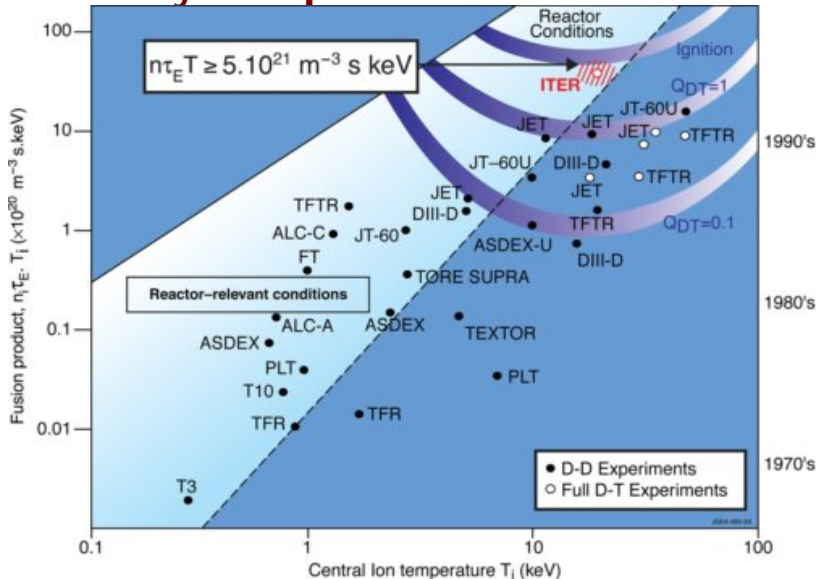
- ▶ Una forma de evitar que el plasma toque las paredes es colocando un delimitador. Esto insertaba impurezas en el reactor
- ▶ Un método más sofisticado consiste en modificar el campo magnético, desviándolo hacia una región especial



El Divertor

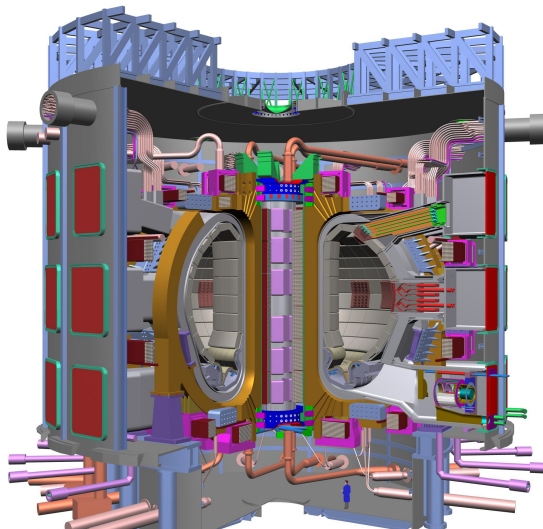


Evolución y Perspectivas



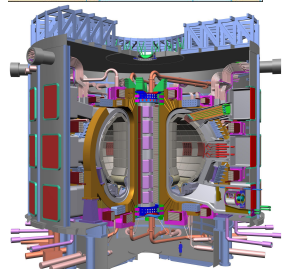
ITER

International Thermonuclear Experimental Reactor



ITER

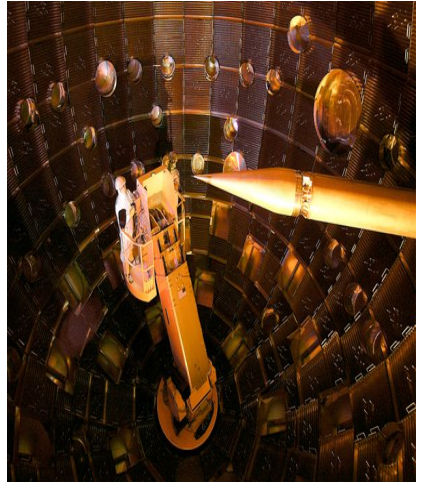
International Thermonuclear Experimental Reactor



Confinamiento Inercial



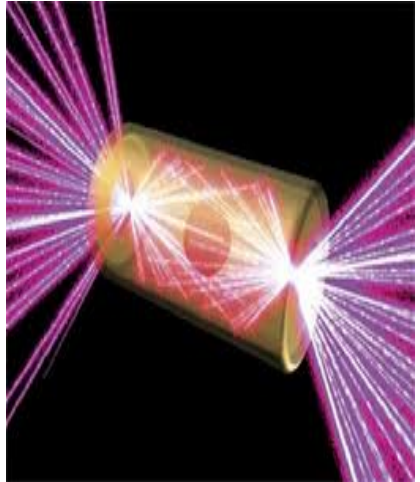
Confinamiento Inercial



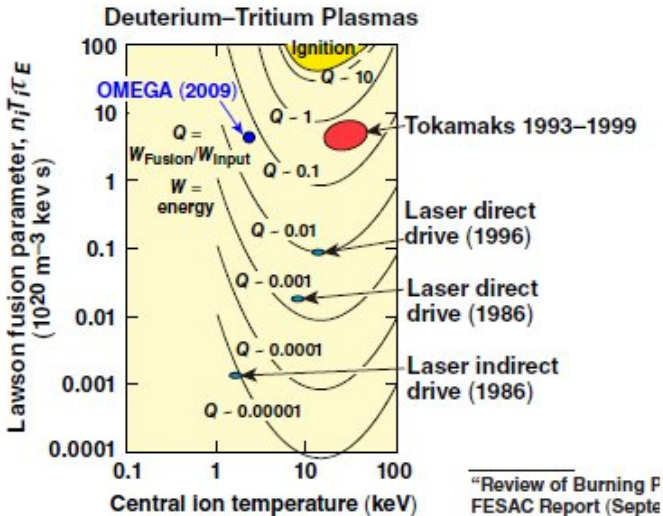
Confinamiento Inercial



Confinamiento Inercial



Confinamiento Inercial



Confinamiento Gravitatorio

