

Fusión: Energía de las estrellas

Los procesos de fusión nuclear son los que proporcionan la energía que alimenta a las estrellas

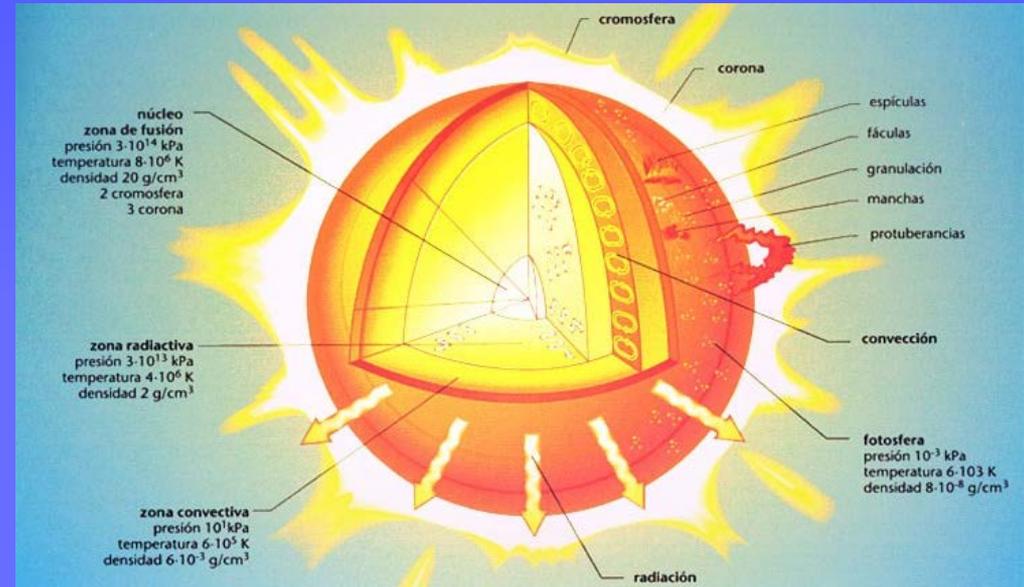
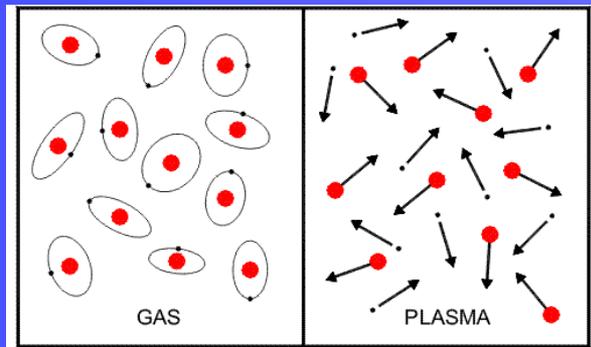
Transit of the Moon (NASA)



Plasma: 4^o estado de la materia

La temperatura en el centro del Sol es de 10 millones de grados.

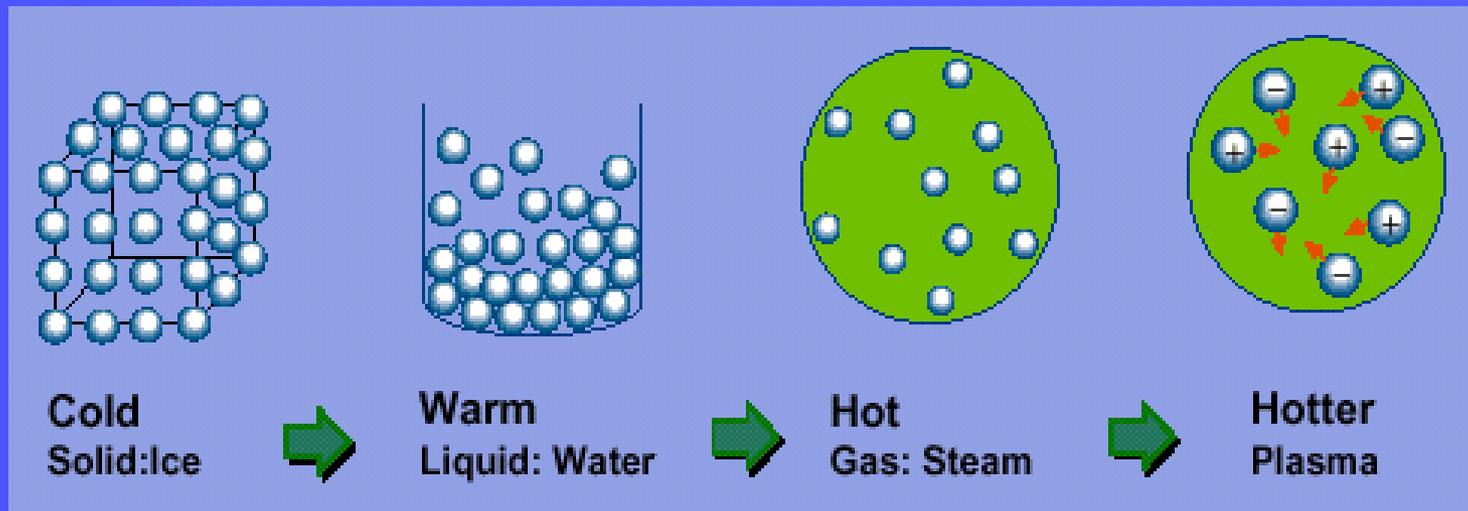
A esa temperatura, el material (hidrógeno y algo de helio) está completamente ionizado (plasma) y confinado por la gravedad.



A esas temperaturas, los protones tienen suficiente energía cinética y pueden vencer su repulsión electrostática y fusionarse en He, liberando energía que calienta al Sol.

En estrellas mayores y más viejas, se fusionan átomos cada vez más pesados hasta que el combustible se acaba y la estrella muere.

¿Qué es?: Un plasma es un gas ionizado



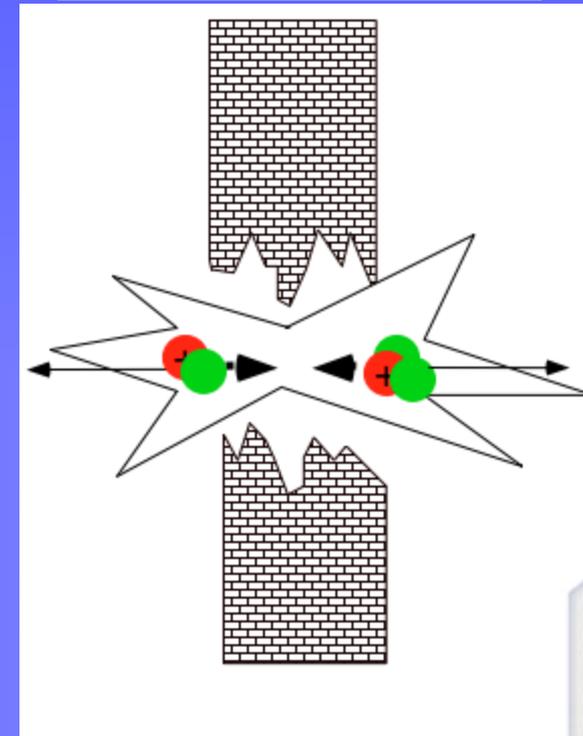
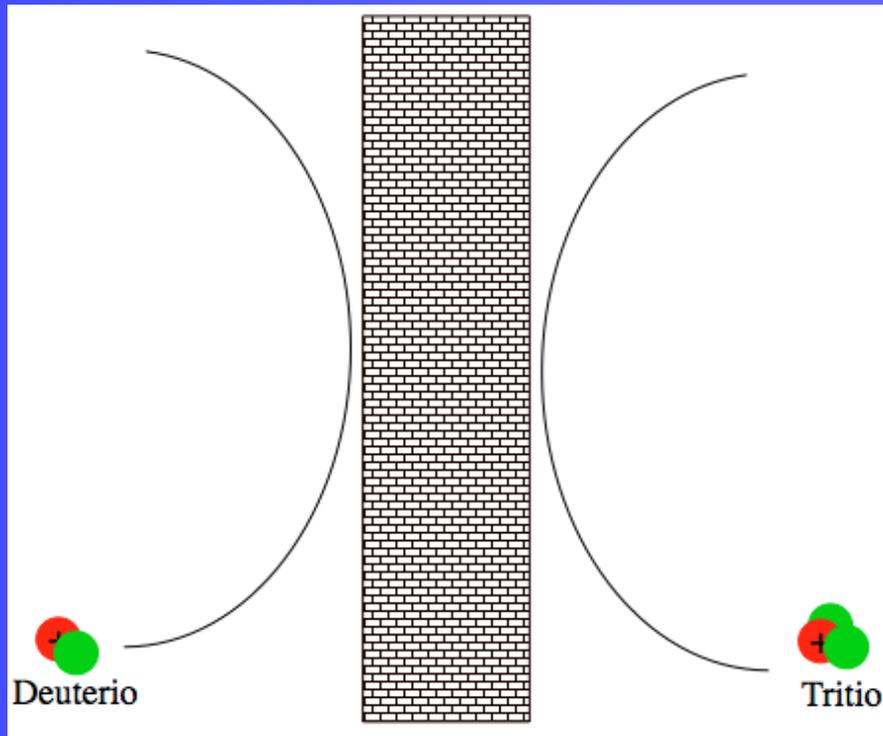
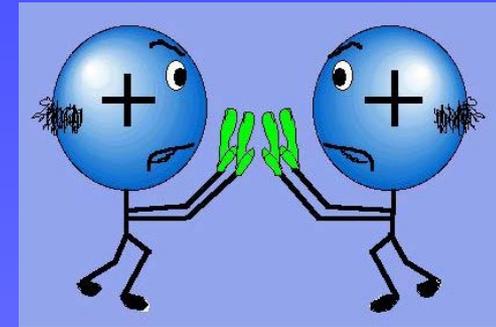
Aumentando la temperatura

Propiedades especiales: conducen la electricidad, se ven afectados por campos eléctricos y magnéticos,...

Problemática de la fusión en la Tierra

Problema para conseguir fusión en un laboratorio
(en la Tierra): Cargas del mismo signo se repelen.

Solución: Lanzar una contra otra a gran velocidad.

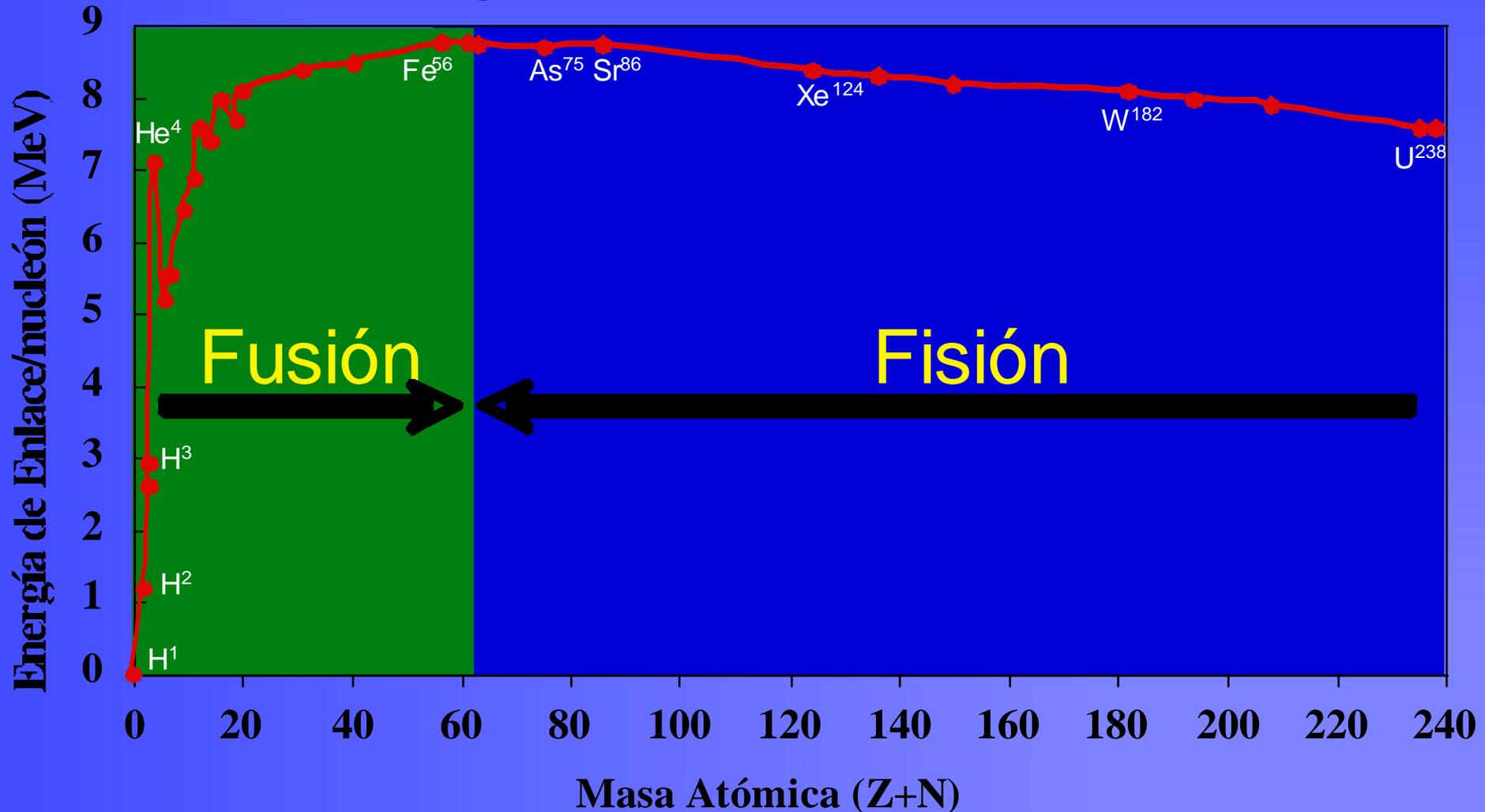


Fuerzas eléctricas repulsivas: largo alcance

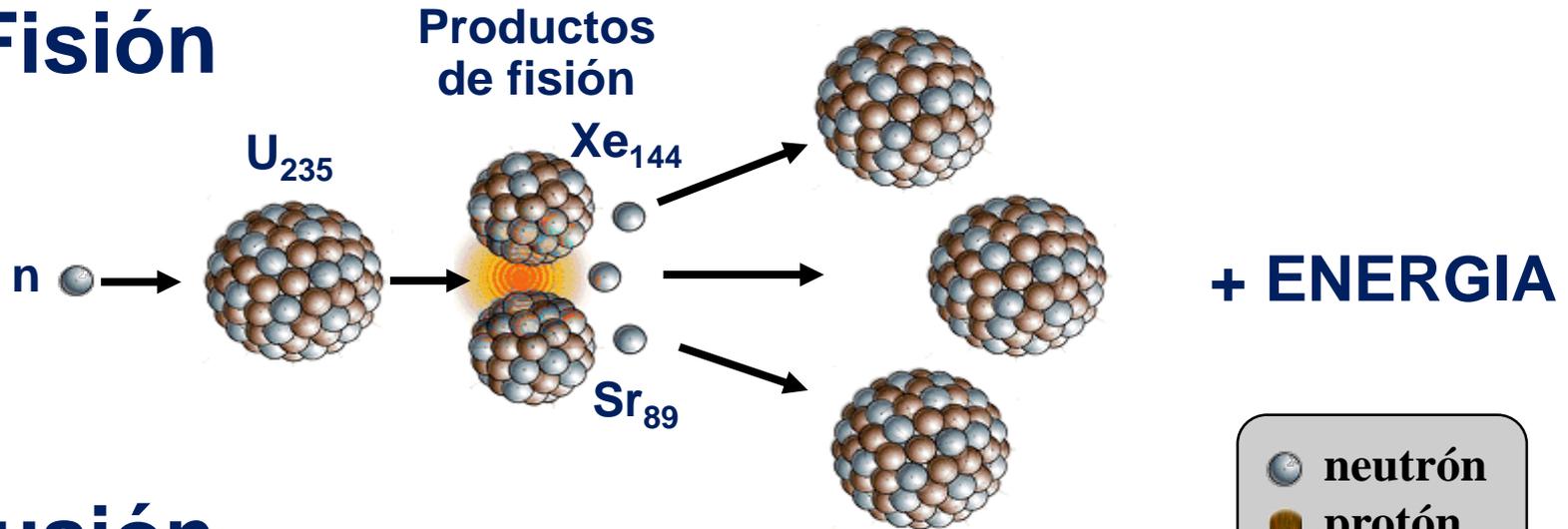
Fuerzas nucleares: corto alcance

Energía de fusión y de fisión

Energía de enlace por nucleón

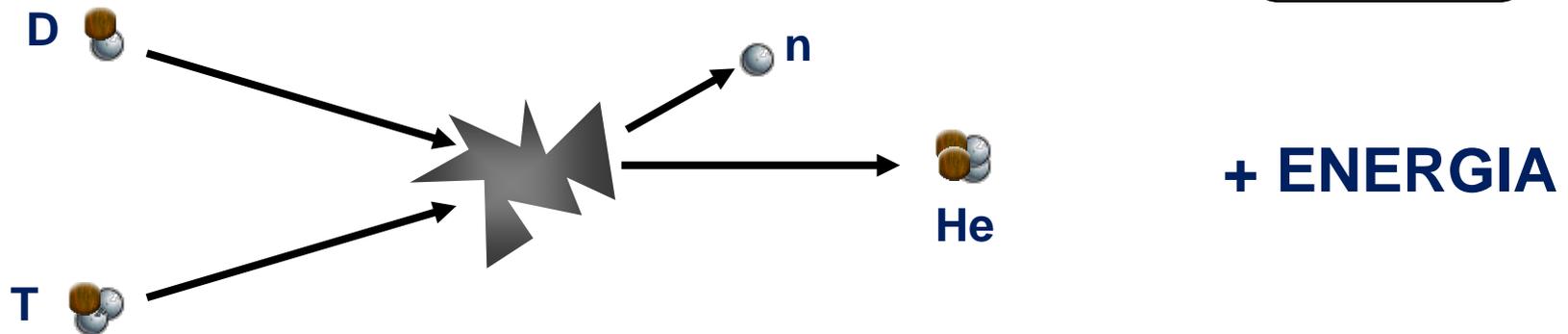


Fisión



● neutrón
● protón

Fusión



¿Cuánta energía se libera?



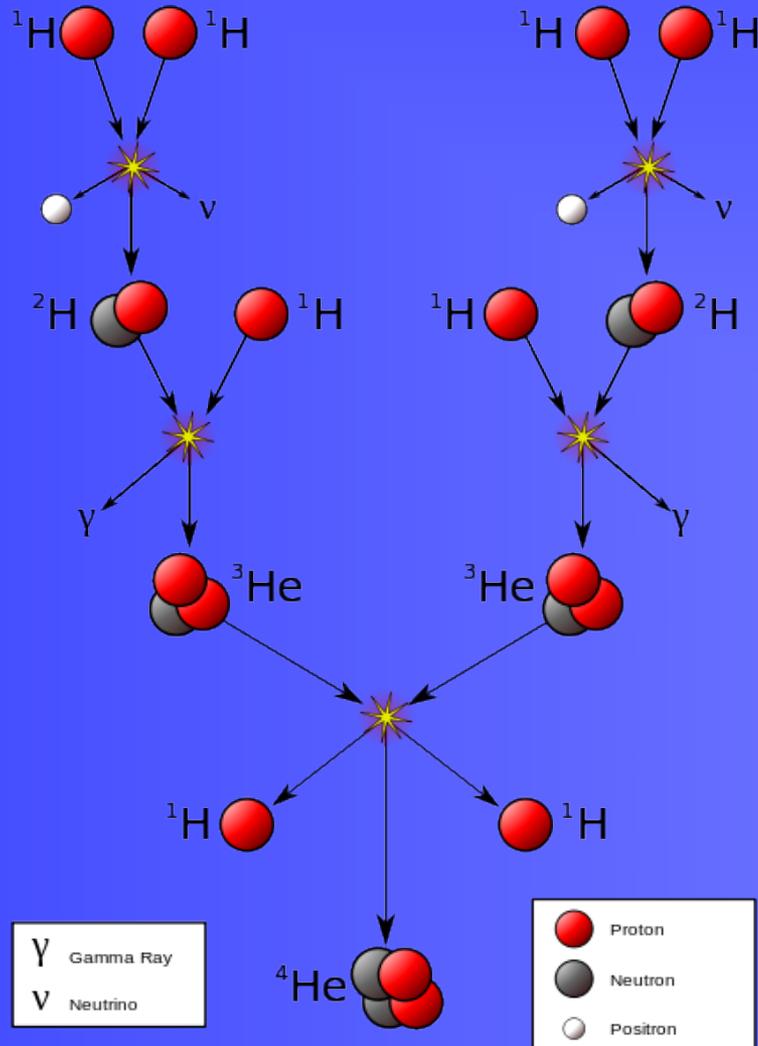
Relación energía-masa Einstein

$$E = mc^2$$

En estos principios se basa:

- Bombas atómicas.
 - Centrales nucleares.
 - Bombas H.
 - Energía de las estrellas.
- } FISIÓN
- } FUSIÓN

Fusión: energía de las estrellas



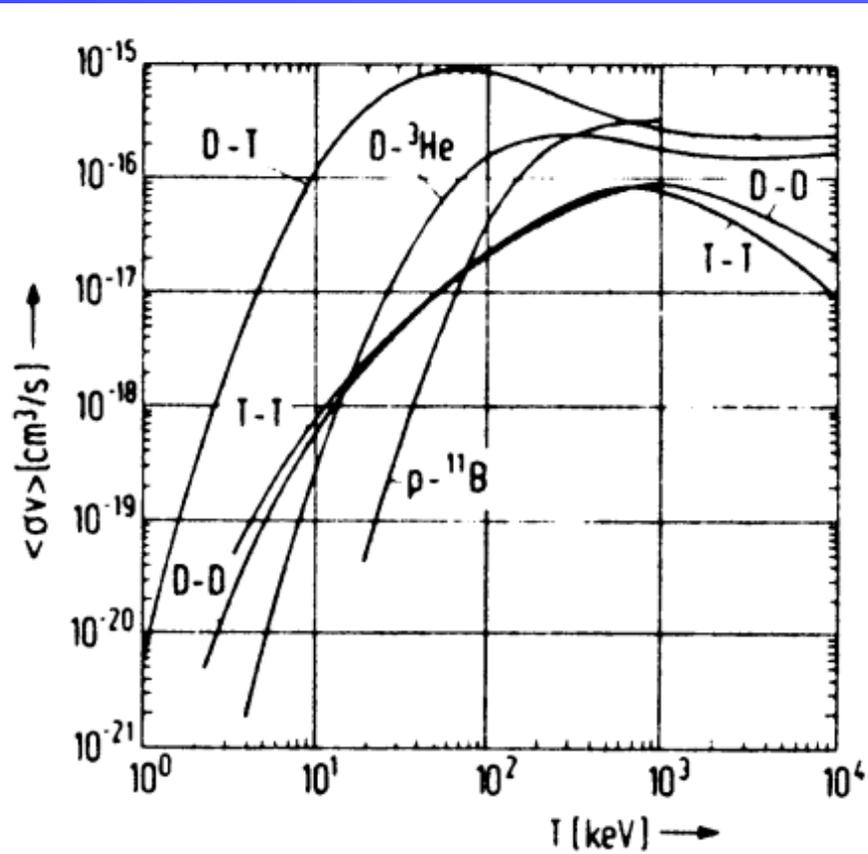
Hans Bethe (1939):

4(6) protones (^1H) se fusionan para dar lugar a helio (^4He) y abundante energía en forma de positrones, neutrinos y radiación que calientan estrellas como el Sol.

$$E = (M[4^1\text{H}] - M[^4\text{He}]) \times c^2$$

Ritmo de fusión es muy bajo, pero el Sol es muy grande y el tiempo de confinamiento es muy largo y la densidad del plasma muy alta.

Fusión: energía de las estrellas



Masa del sol = 2×10^{30} kg

Densidad = 1.6×10^5 kg/m³ = 10^{32} m⁻³

Número reacciones/s = 9×10^{37}

Masa fusionada/s = 6.2×10^{11} kg

Reacciones/(kg x s) = 4.5×10^7

Potencia generada = 4×10^{26} W = 4×10^{17} GW

Temperatura = 10 millones de grados



Masa combustible (50/50 D+T) = 3×10^{-3} kg

Densidad = 4.2×10^{-6} kg/m³ = 10^{21} m⁻³

Numero de reacciones/s = 1.5×10^{20}

Masa fusionada/s = 1.6×10^{-6} kg.

Reacciones/(kg x s) = 5×10^{22}

Potencia generada = 5×10^9 W = 5GW

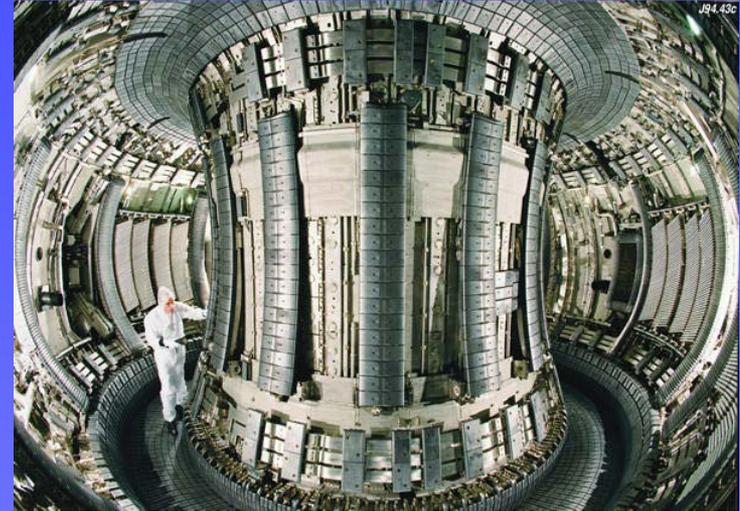
Temperatura = 100 millones de grados

Fusión: ¿energía para la Tierra?

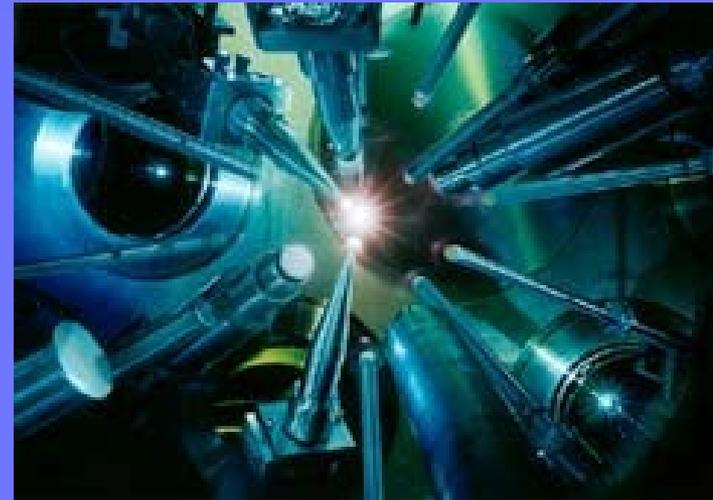
Recipiente confinante \ll el SOL.

Temperaturas ($\sim 10x$) y reacción diferente para que la potencia generada sea la suficiente (mayor que la empleada en crear y calentar el plasma).

El confinamiento se consigue mediante el empleo de campos magnéticos, eléctricos y láseres.

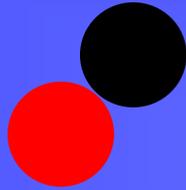


Conf. Magnético (tokamak JET, Abingdon, UK)



Conf. Inercial (NIF, LLNL, EE.UU.)

Deuterio



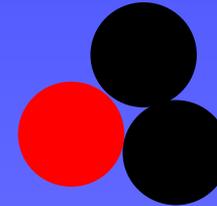
No es radioactivo

La mayor parte del Deuterio se produjo en el Big Bang

Abundancia en la Tierra: 0.015% de todo el Hidrógeno (esp. océanos)

Se concentra en forma de agua pesada (D_2O) para usos industriales.

Tritio



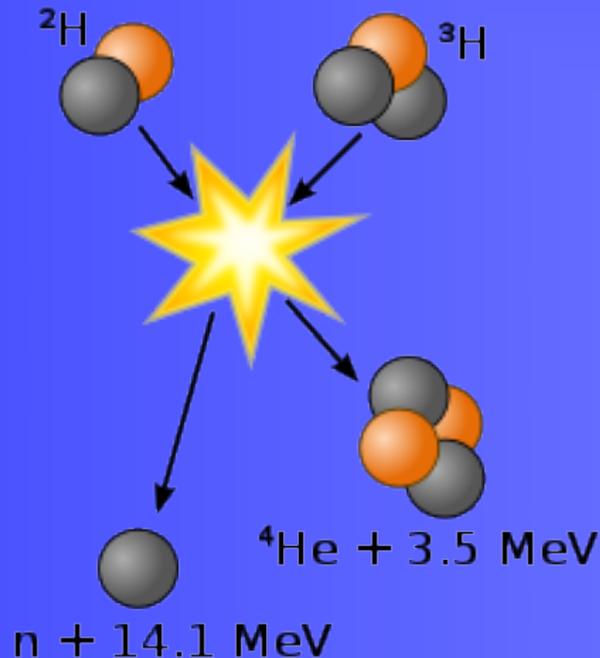
Radioactivo (emisor β , v.m.=12 años)



Creado a partir de Litio (Li):



Abundancia del Litio: 65 ppm en la corteza terrestre



neutrones no se usan:
NO es una reacción en cadena

$T \sim 100$ millones de grados

Para que un plasma de fusión sea rentable desde el punto de vista energético, ha de verificar el **CRITERIO DE LAWSON**:

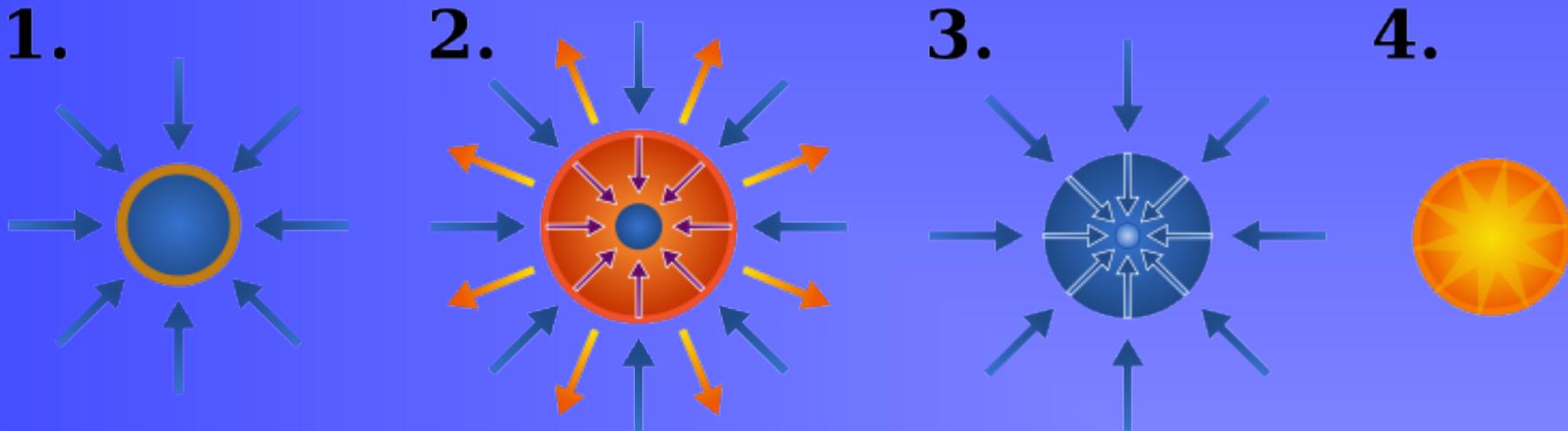
$$n \cdot T \cdot \tau_E > 5 \times 10^{21} \text{ keV} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$$



John D. Lawson
(1923-2008)

Una pastilla de D+T se comprime a muy altas densidades hasta superar el Criterio de Lawson y conseguir la ignición.

$$\tau \sim 10^{-10} \text{ s}$$
$$T \sim 25 \text{ keV}$$
$$n \sim 10^{30} \text{ m}^{-3}$$



1. Se calienta mediante láser la superficie, formando un plasma envolvente.
2. El D+T se comprime por la reacción a la evaporación violenta del envoltorio.
3. La implosión produce densidades muy altas a temperaturas de 100,000,000 °C.
4. Sucede la fusión termonuclear y la emisión de energía.

National Ignition Facility



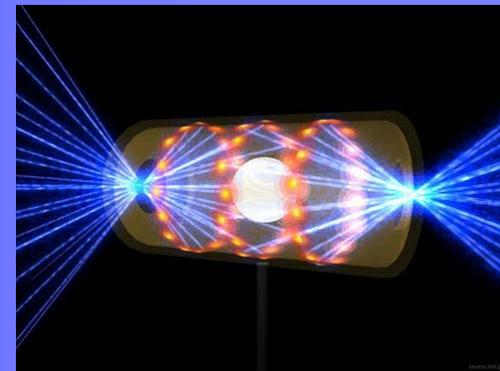
Livermore, California (USA)
Lawrence-Livermore-
National-Laboratory (LLNL).

192 Láseres (20KJ/láser)
500 TeraWatts (1Tera= 10^{12}) en
1 picroseg. (1pico= 10^{-12})

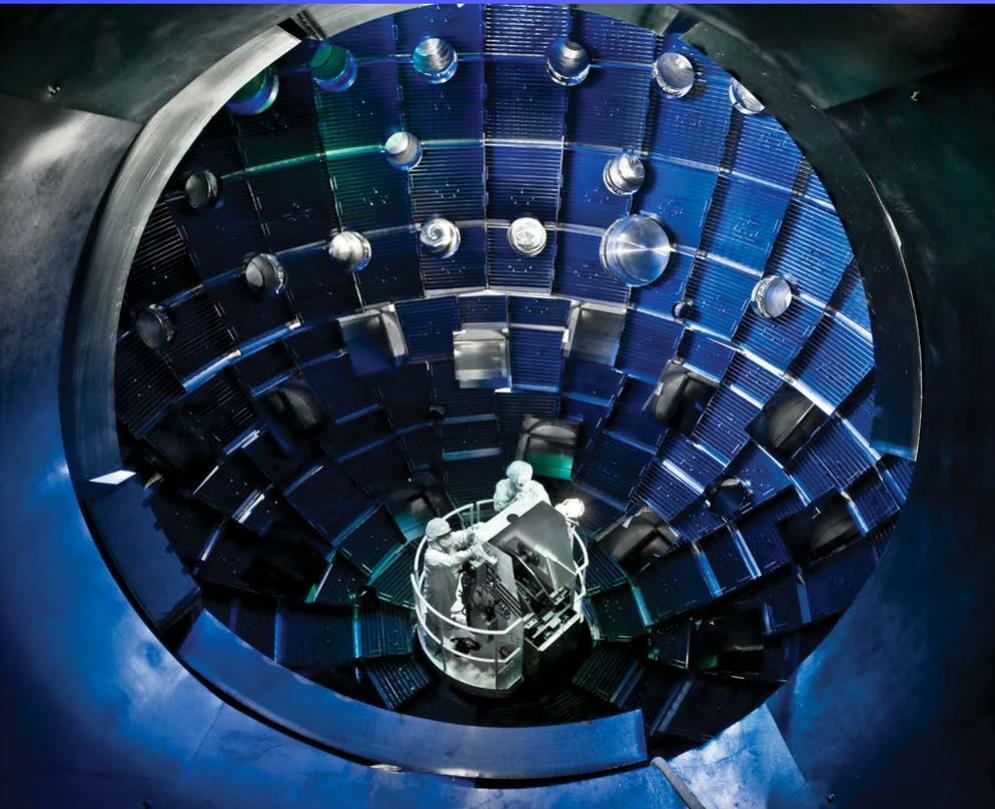


Laser hall

Objetivo: Demostrar ignición.
Presupuesto: 2000 M€.

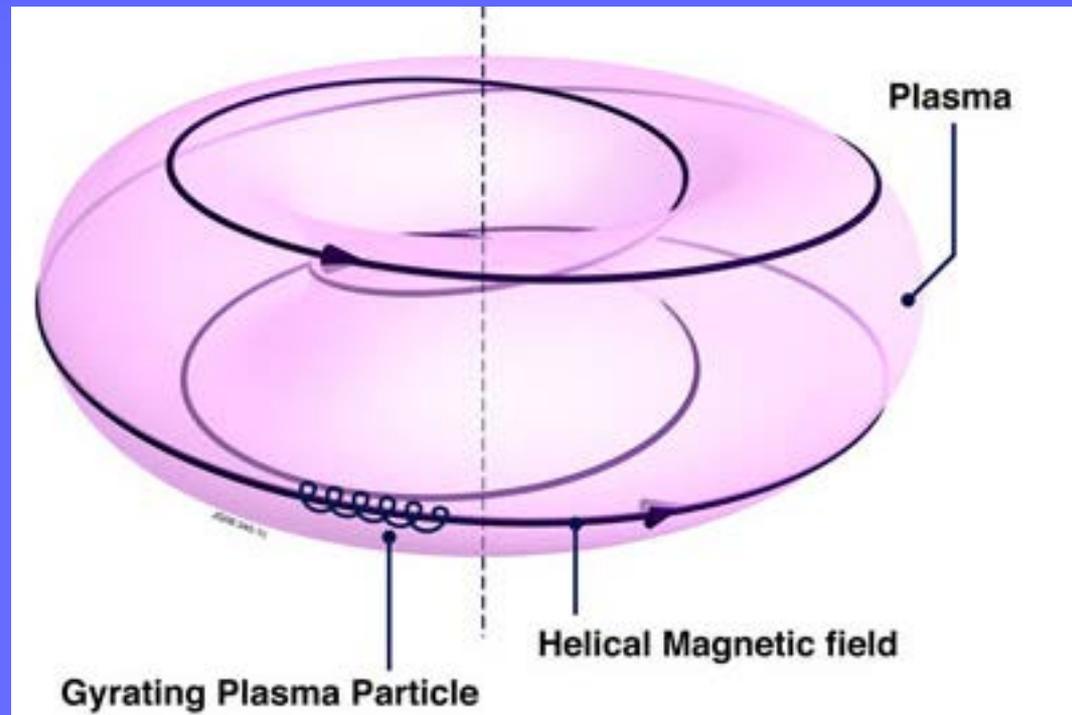
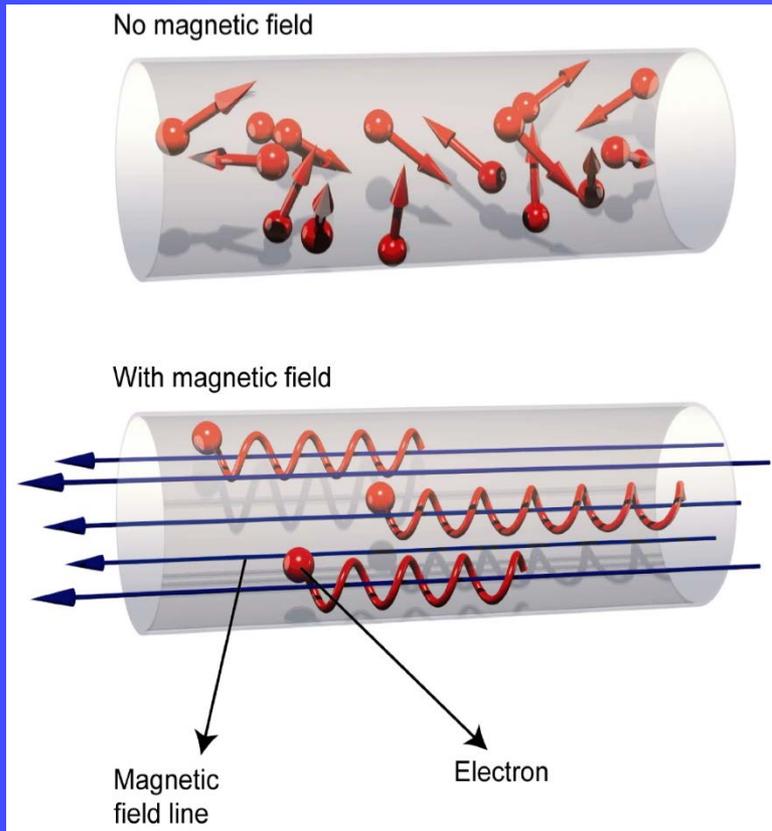


Indirect drive



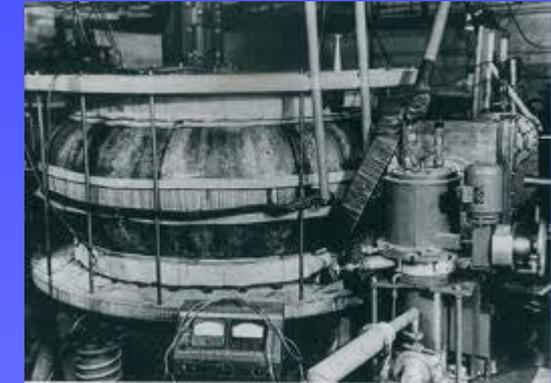
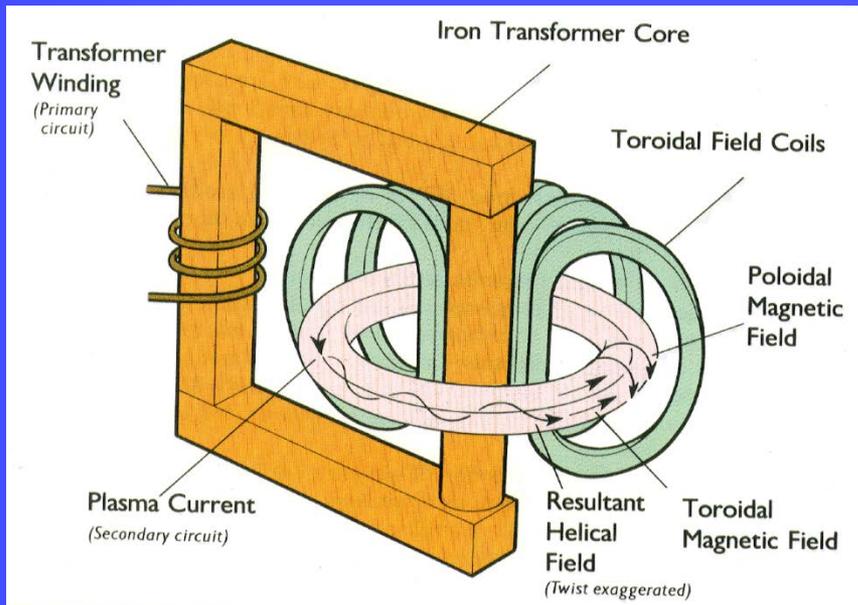
Confinamiento magnético

$$\tau \sim 1 - 10s$$
$$T \sim 25 \text{ keV}$$
$$n \sim 10^{20} \text{ m}^{-3}$$

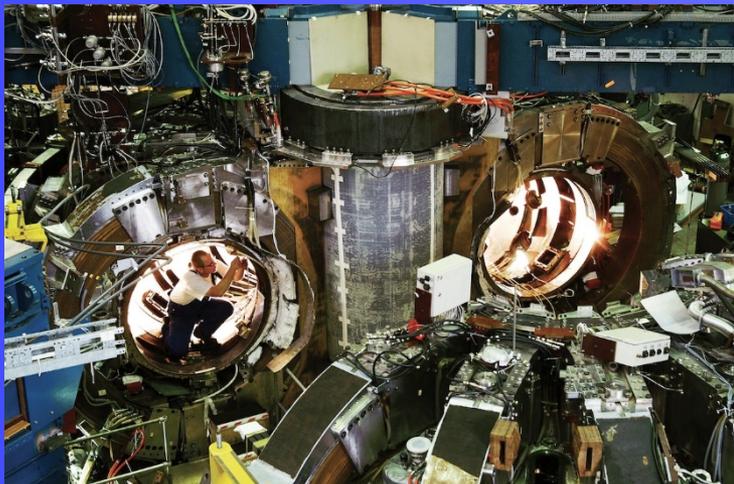


Las líneas magnéticas han de ser helicoidales

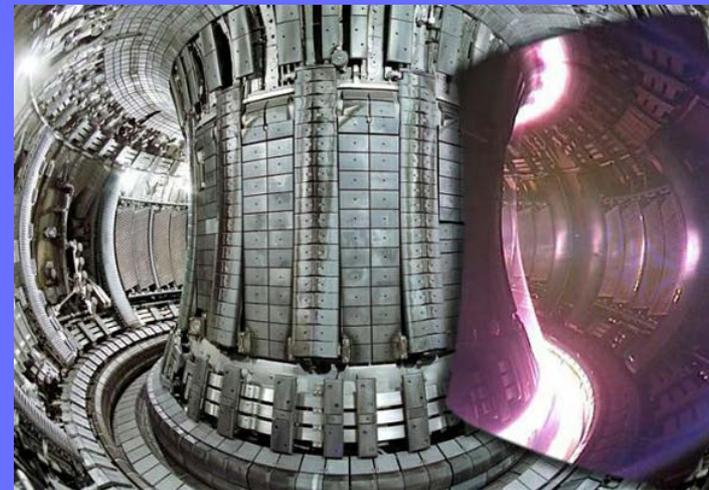
El tokamak



T-1
URSS



Textor, Alemania

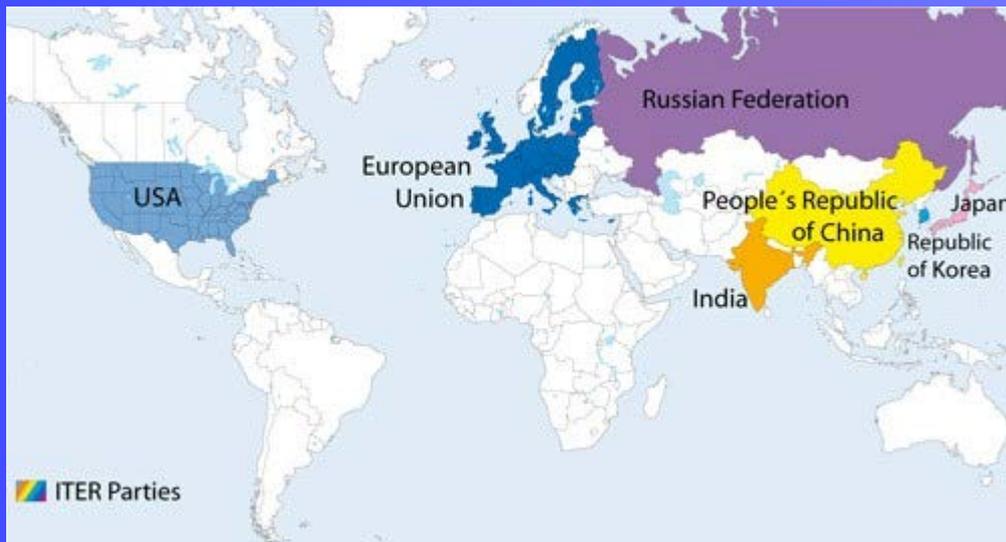
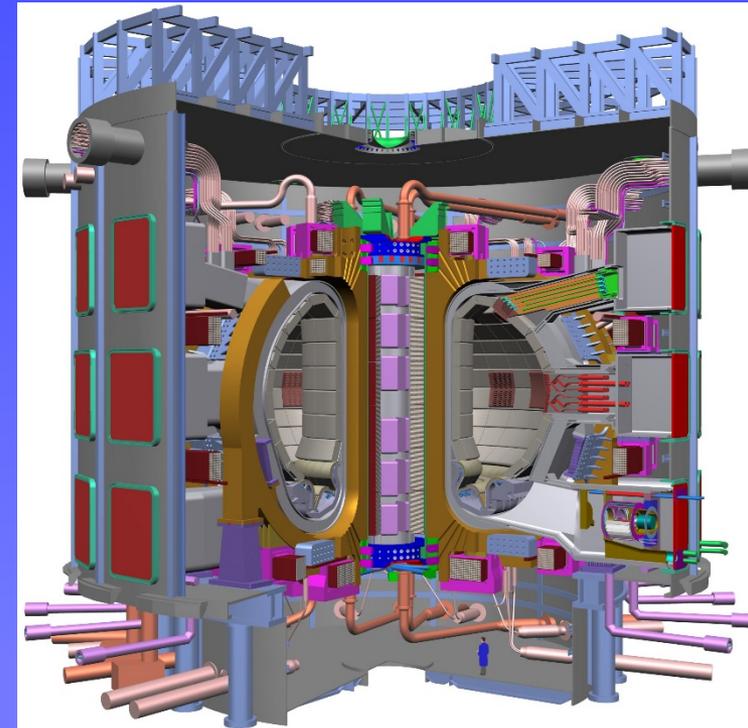


JET
UE

El campo toroidal se genera mediante corrientes. El campo poloidal se genera haciendo que una corriente toroidal fluya en el plasma.

El proyecto ITER

- Proyecto internacional de tokamak con el objetivo fundamental de probar la viabilidad tecnológica de la fusión.
- La construcción empezó en el 2008.
- Primer plasma: 2025.
- Tendrá un coste de ~30000 M€.
- Ubicado en Cadarache (Francia).



<http://www.iter.org>



El proyecto ITER

Objetivo: Demostrar break-even ($Q > 1$) e ignición ($Q = \infty$).

Producir 500 MW de potencia de salida por 50 MW de potencia de entrada ($Q=10$).

Es el proyecto científico e ingenieril más complicado que se ha acometido en la historia de la Humanidad.

Solo comparable a la Estación Espacial Internacional (ISS).

Factor Q :

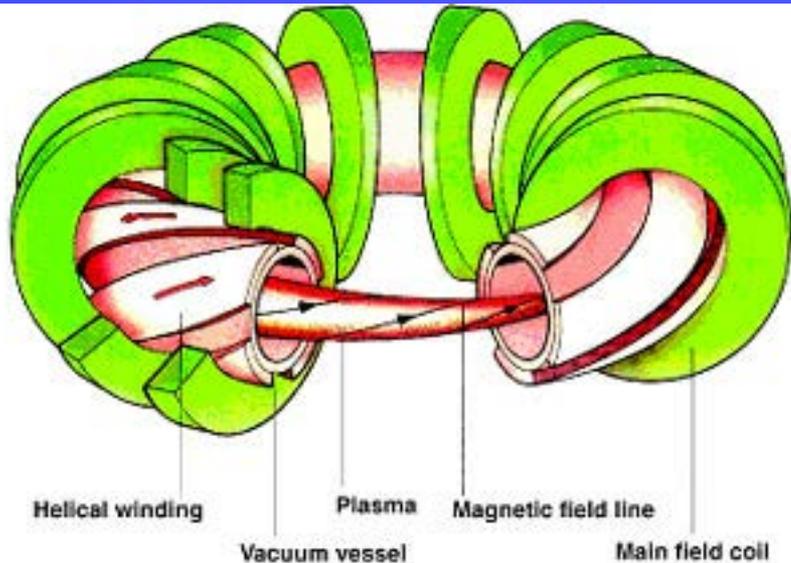
$$Q = \frac{P_{\text{fusión}}}{P_{\text{inyectada}}} \quad \left\{ \begin{array}{l} Q = 1; \text{ break-even} \\ Q = \infty; \text{ ignición} \end{array} \right.$$

- 80000 km de cables superconductores (aleación Nb y Sn). Se han producido alrededor de 400 toneladas en menos de 4 años (150 Toneladas/año).
- El peso de ITER es 23000 toneladas (más de 3 Torres Eiffel).
- El plasma de ITER será de 840 m³ (el máximo actual es de 100 m³).
- Número máximo de trabajadores: 5000.
- El transporte por carretera (“itinerario ITER”) de piezas de casi 1000 toneladas. Se hará en muchos casos por control remoto y con vehículos de más de 30 m de largo y 10 m de ancho. Más de 100 kms de carreteras construidas.
- Cada bobina toroidal (18) pesa 360 toneladas (es el peso de un Boeing 747 lleno).
- Altura del edificio que aloja ITER: 60 m.
- Área del laboratorio: 42 Ha (= 60x campos de fútbol).
- Las temperatura del plasma será de 150 millones de °C (en el interior del Sol son 10 millones de °C).
- El factor $Q > 10$. Esto significa que se generarán 500 MW de potencia.

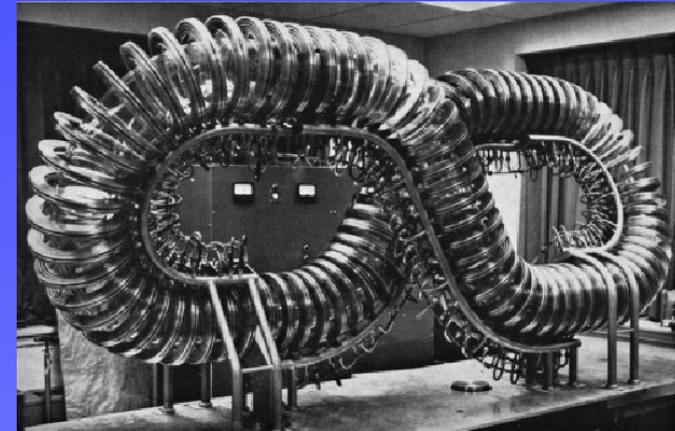
El proyecto ITER



El stellarator



W-1
Alemania



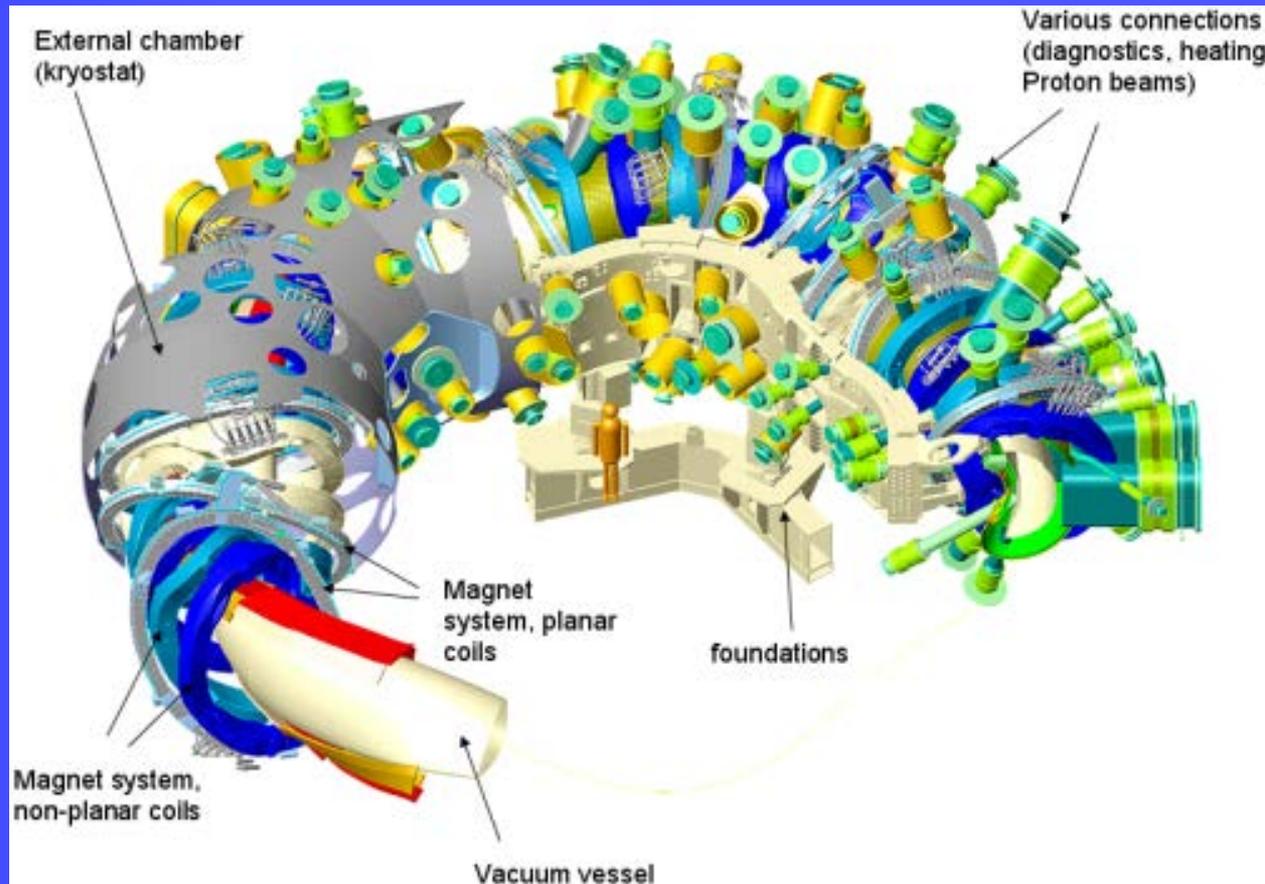
LHD, Japón



TJ-II
España

El campo toroidal y el campo poloidal se generan mediante corrientes externas al plasma.

W7-X (Wendelstein 7-X)



Greifswald, Alemania.
Max-Planck-Institut
für Plasmaphysik (IPP).



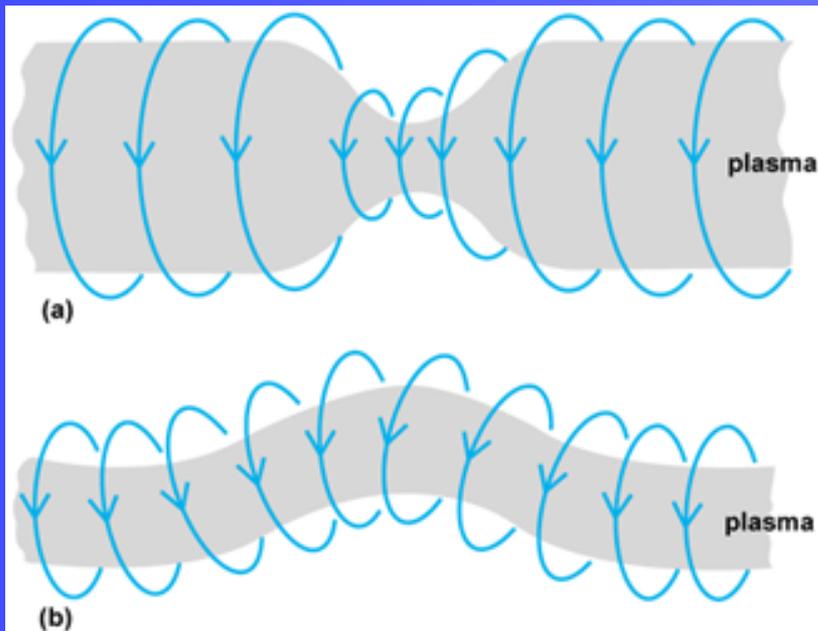
Objetivos: Demostrar la posibilidad de operar un stellarator continuamente. Demostrar estrategias de diseño.

Presupuesto: 5000 M€.

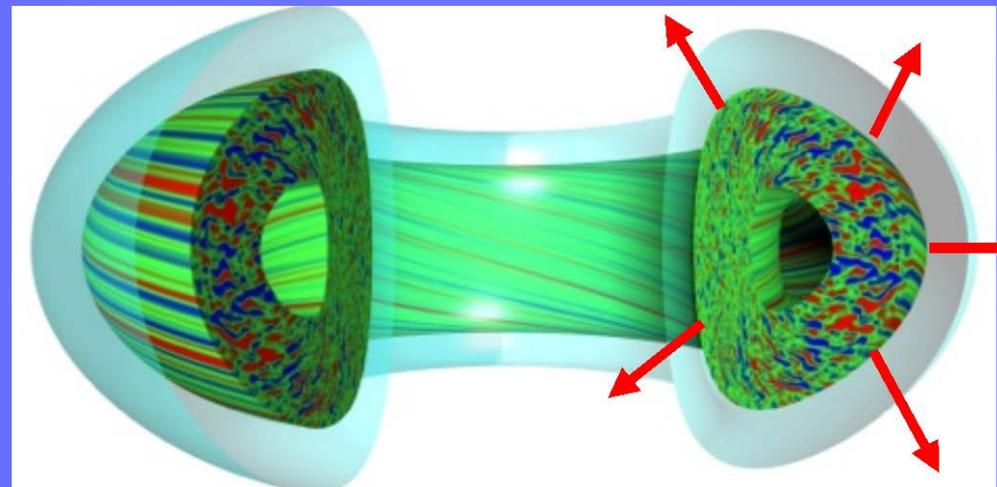
Conseguir la fusión está siendo mucho más difícil de lo que se pensaba en los 50's.

- Famosa coletilla: *"FUSION CONSTANT = 30 years till fusion succeeds"*
- ¿Por qué es tan difícil? → Sistema altamente no-lineal!

ESTABILIDAD MHD



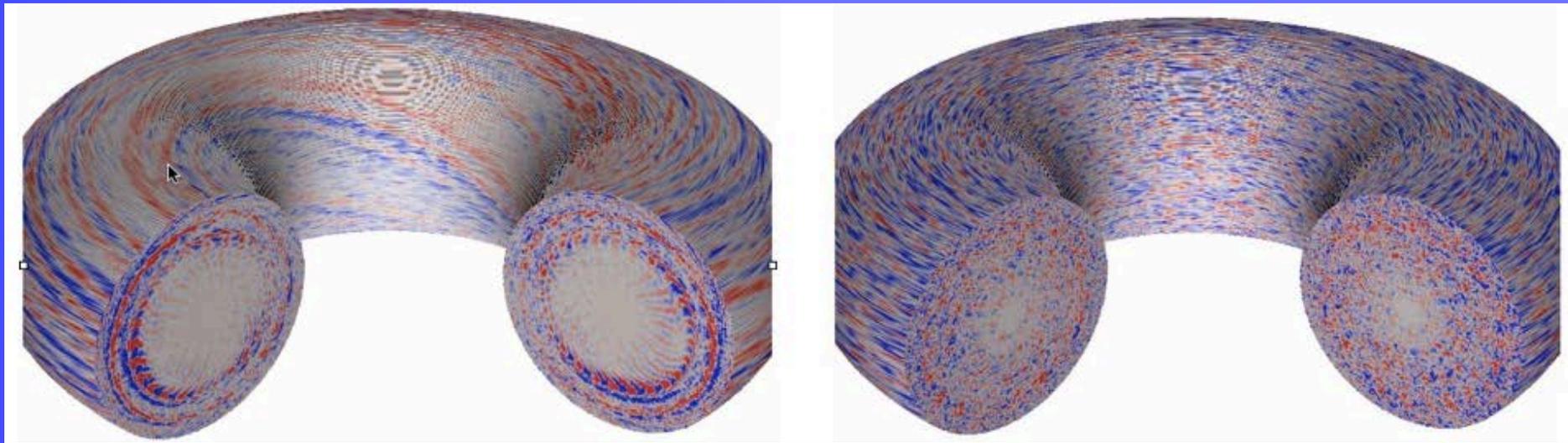
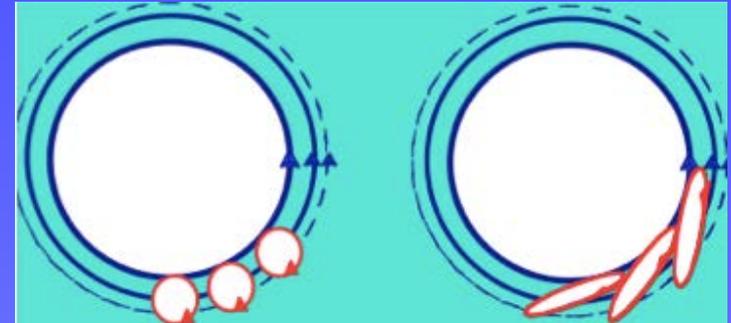
TURBULENCIA



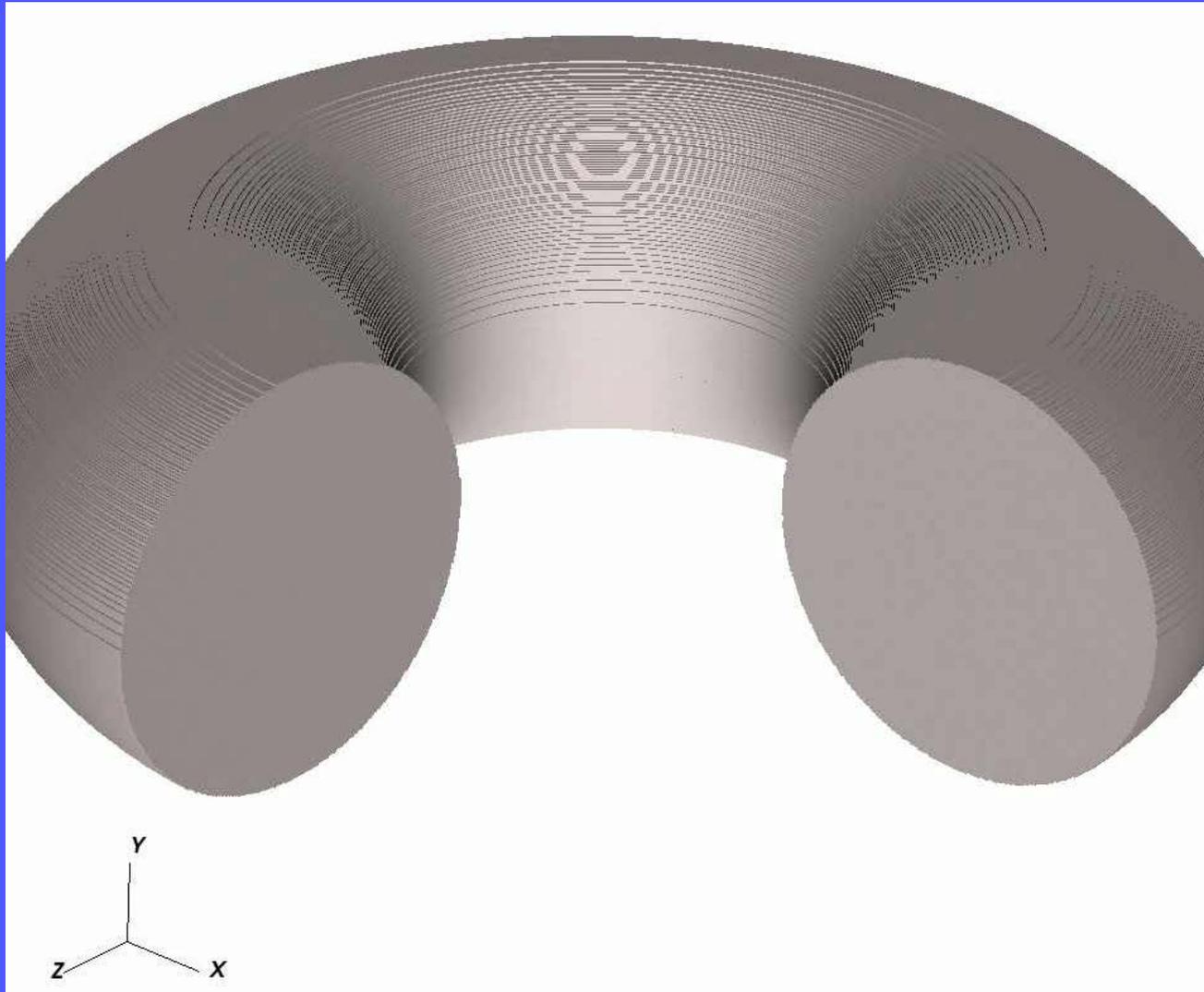
GYRO, General Atomics



ITER, al igual que otros muchos dispositivos de fusión por confinamiento magnético, dependen de los flujos con cizalladura (shear flows) para suprimir la turbulencia.

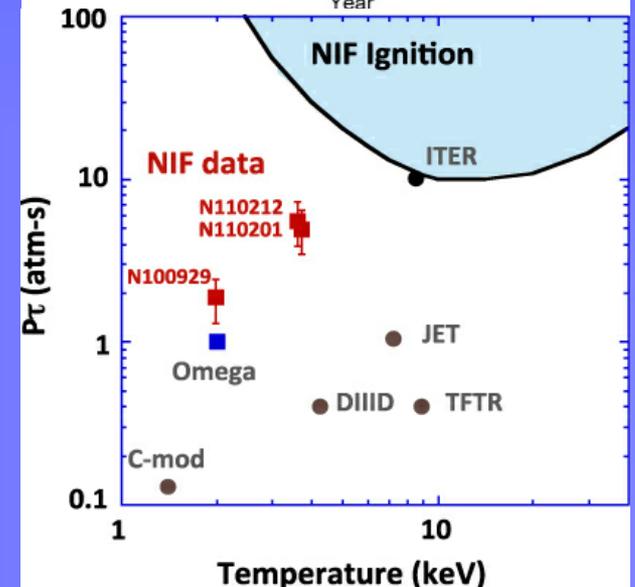
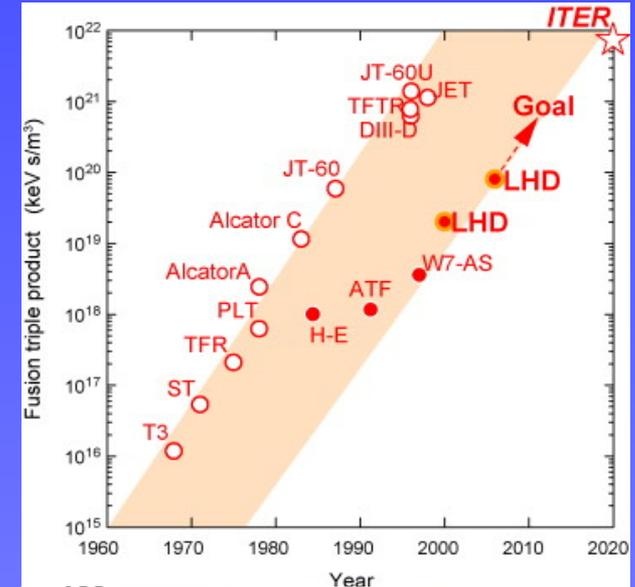
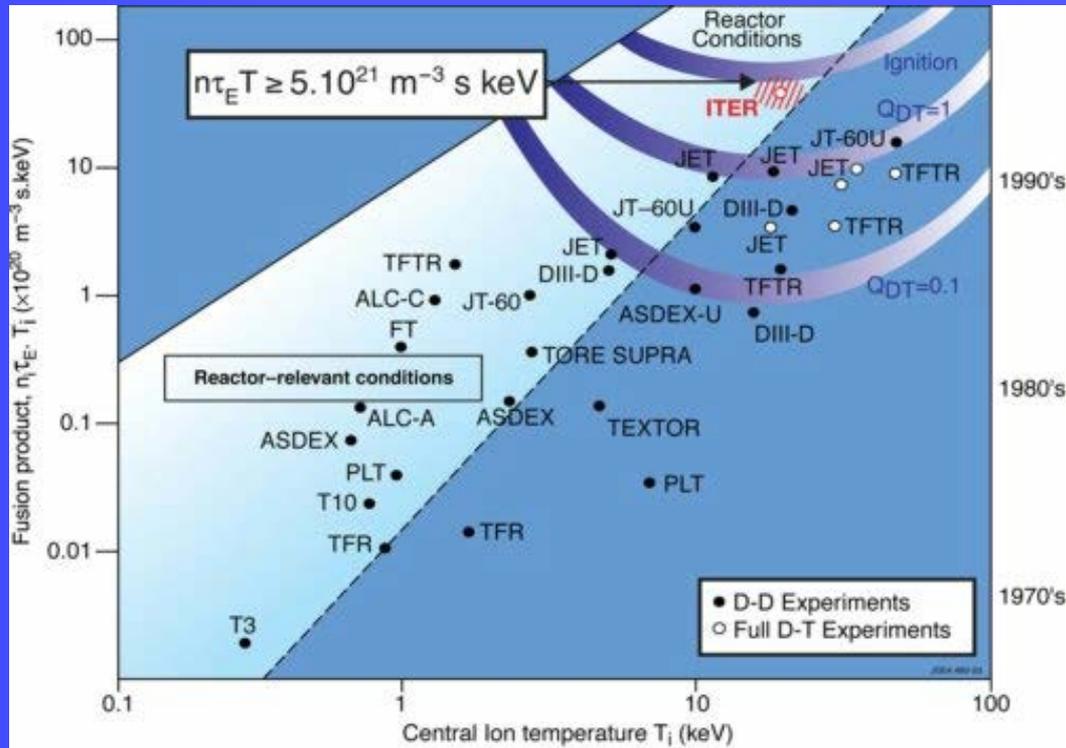


ITG turbulence, UCAN code



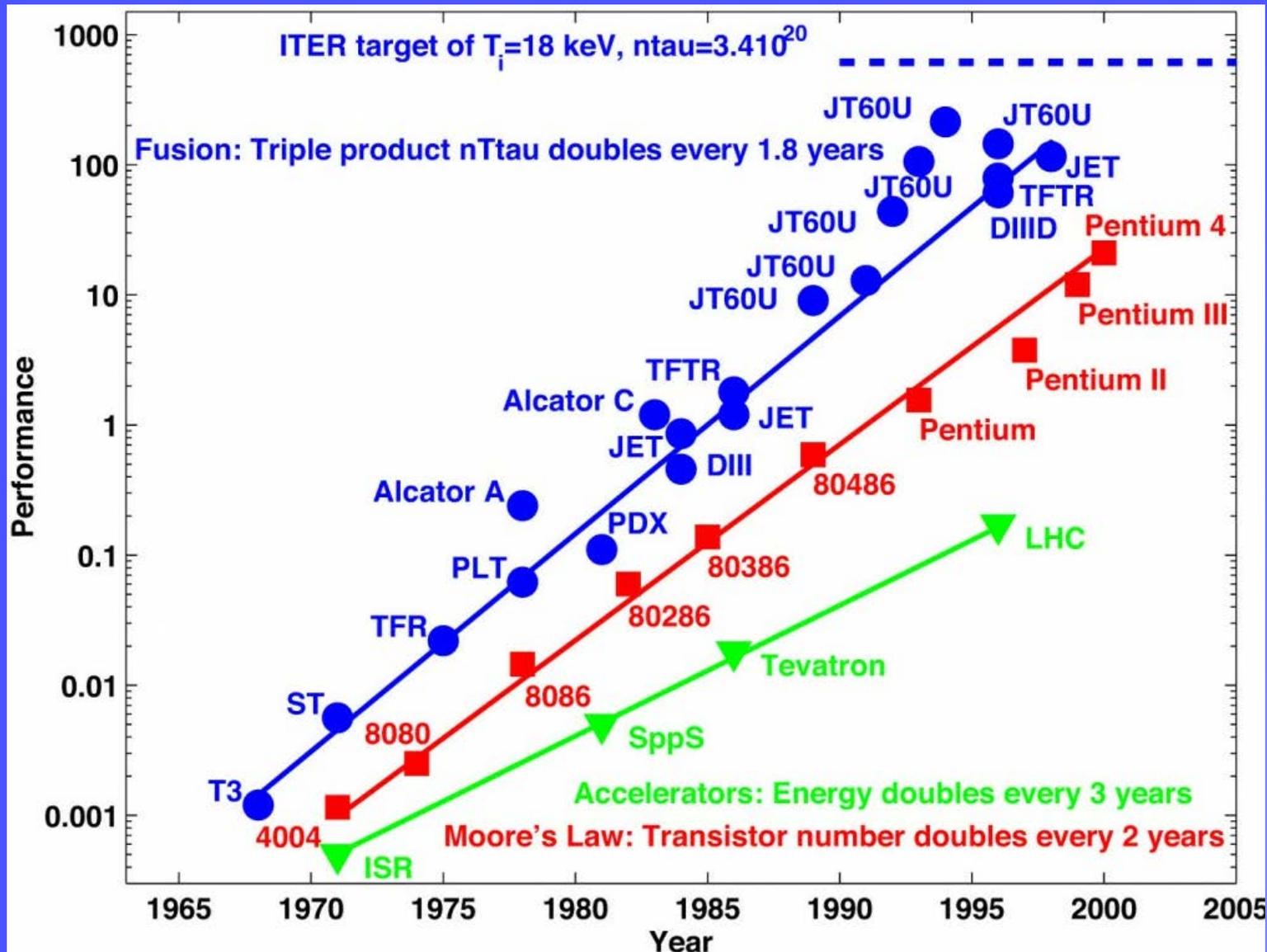
ITG turbulence, UCAN code

Progreso en fusión: El criterio de Lawson



John D. Lawson
(1923-2008)

Progreso en fusión: comparación con otros campos



Fusión nuclear (CM): problemas abiertos

Demostrar que se puede producir energía neta ($Q > 1$) de forma estacionaria.

Producir un plasma en ignición, mantenerlo y estudiar la física dominante en el mismo.

Desarrollar y probar mecanismos de control pasivo y activo de (nuevas?) turbulencias e inestabilidades en plasmas en ignición.

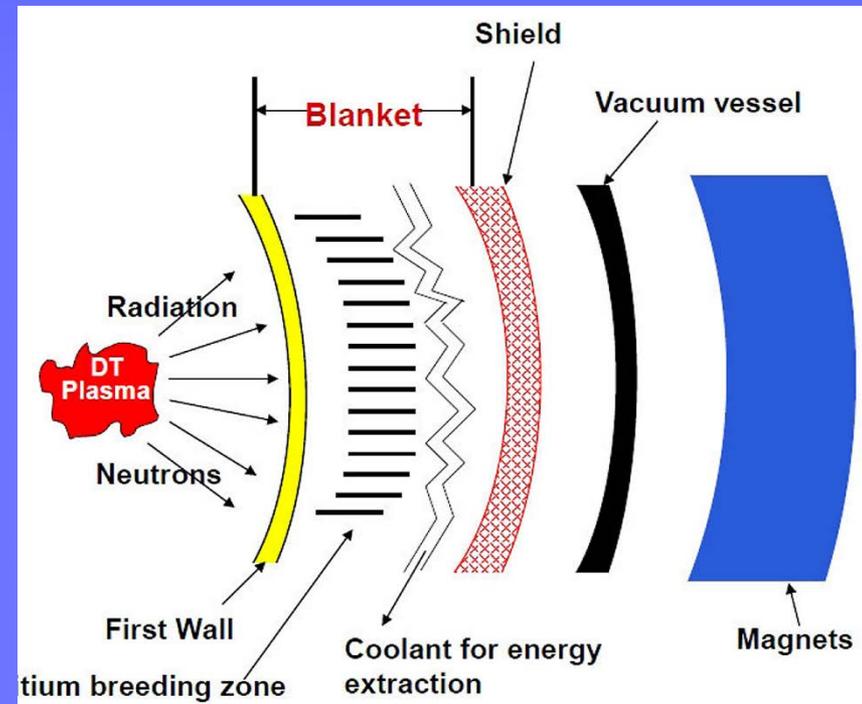
Desarrollar nuevos materiales (bombardeo de neutrones, disipación de calor, etc.).

Desarrollar esquemas de producción de Tritio.

Desarrollar y probar tecnologías de alto vacío, criogenia y materiales superconductores.

Desarrollar tecnologías de acceso remoto.

Probar la integración de todos estos sistemas y tecnologías.



Demostrar que se puede alcanzar la ignición.

Mejorar el diseño de la pastilla de combustible y su irradiación por láser para controlar inestabilidades y aumentar la eficiencia del proceso.

Desarrollar tecnologías para acumular suficiente energía que permita hacer funcionar los láseres con la potencia y frecuencia necesaria.

Aumentar la frecuencia de disparo de unos pocos al día a una decena por segundo.

Desarrollar y probar esquemas de producción Tritio.

Desarrollar y probar esquemas de producción de pastillas Deuterio+Tritio baratos y masivos.

Desarrollar nuevos materiales (bombardeo de neutrones, disipación de calor, etc.).

Desarrollar y probar tecnologías de acceso remoto.

Probar la integración de todos estos sistemas y tecnologías.

Fusión nuclear (CM): reactor (2050?)

TECNOLOGÍAS:

Criogenia.

Súper alto vacío.

Materiales superconductores.

Microondas, haces de iones.

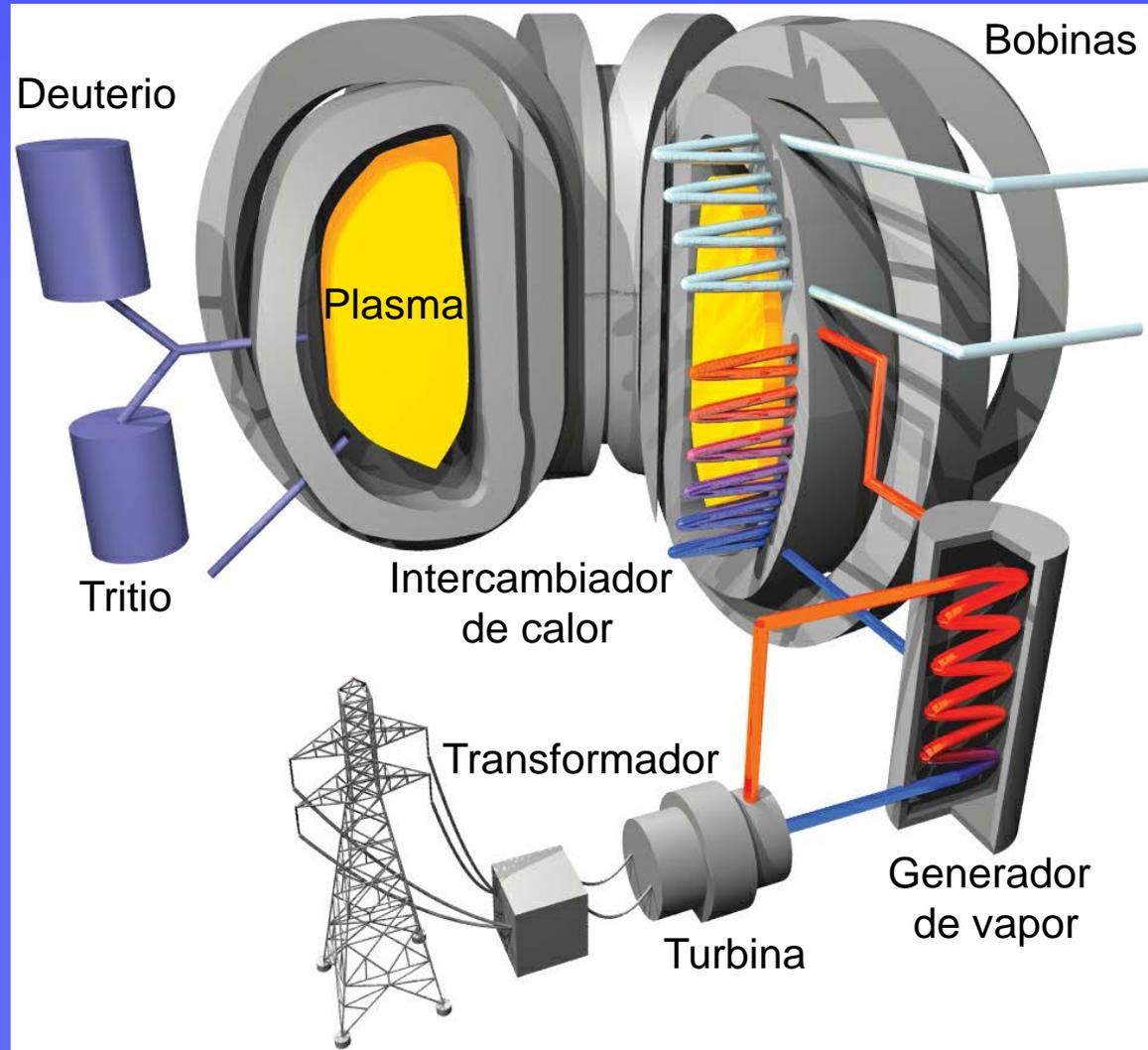
Manejo y producción de Tritio.

Control del daño por neutrones.

Acceso remoto.

Intercambiador de calor.

INSTALACIÓN NUCLEAR



TECNOLOGÍAS:

Láseres de alta potencia.

Producción de pastillas.

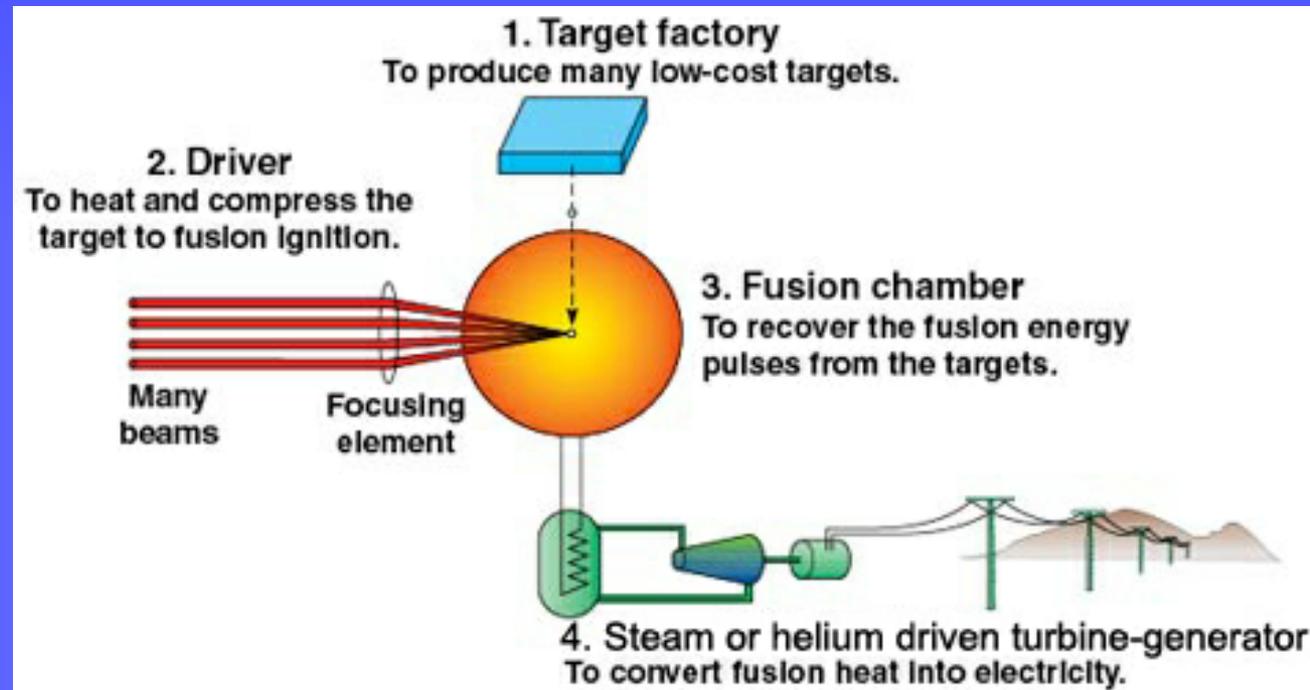
Alineación pastilla-láser.

Manejo y producción de Tritio.

Control del daño por neutrones.

Acceso remoto.

Intercambiador de calor.



INSTALACIÓN NUCLEAR

Sostenible: producción escalable para cubrir la demanda durante largos periodos de tiempo (100 - 1000 años).

Renovable: su combustible se “renueva” de forma natural o es inagotable en la práctica.

Limpia: produce pocos residuos y son de baja peligrosidad.

Segura: nula probabilidad de accidentes catastróficos. Total confinamiento de otros posibles accidentes.

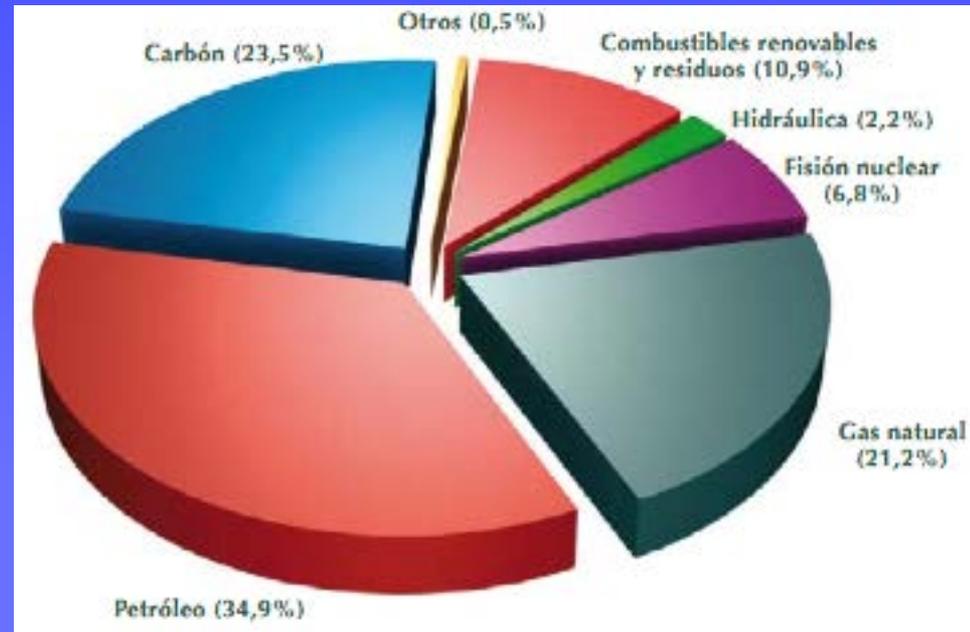
Ecológica: bajo impacto sobre el medio ambiente, baja o nula emisión de gases de efecto invernadero.

Disponible: su fuente está distribuida uniformemente a nivel mundial, para evitar desigualdades y tensiones políticas. Y puede generarse dónde y cuándo hace falta.

Barata: precio asequible del Kilovatio-hora.

Consumo energético mundial

País	Millones de habitantes	Consumo energía (Mtep/año)	Consumo persona (tep/año-pers)
China	1410	3105	2.2
USA	325	2201	6.8
India	1340	934	0.7
Rusia	144	744	5.2
Japón	127	429	3.4
Alemania	82	314	3.8
Corea S.	51	296	5.8
Brasil	209	291	1.4
Canadá	37	287	7.8

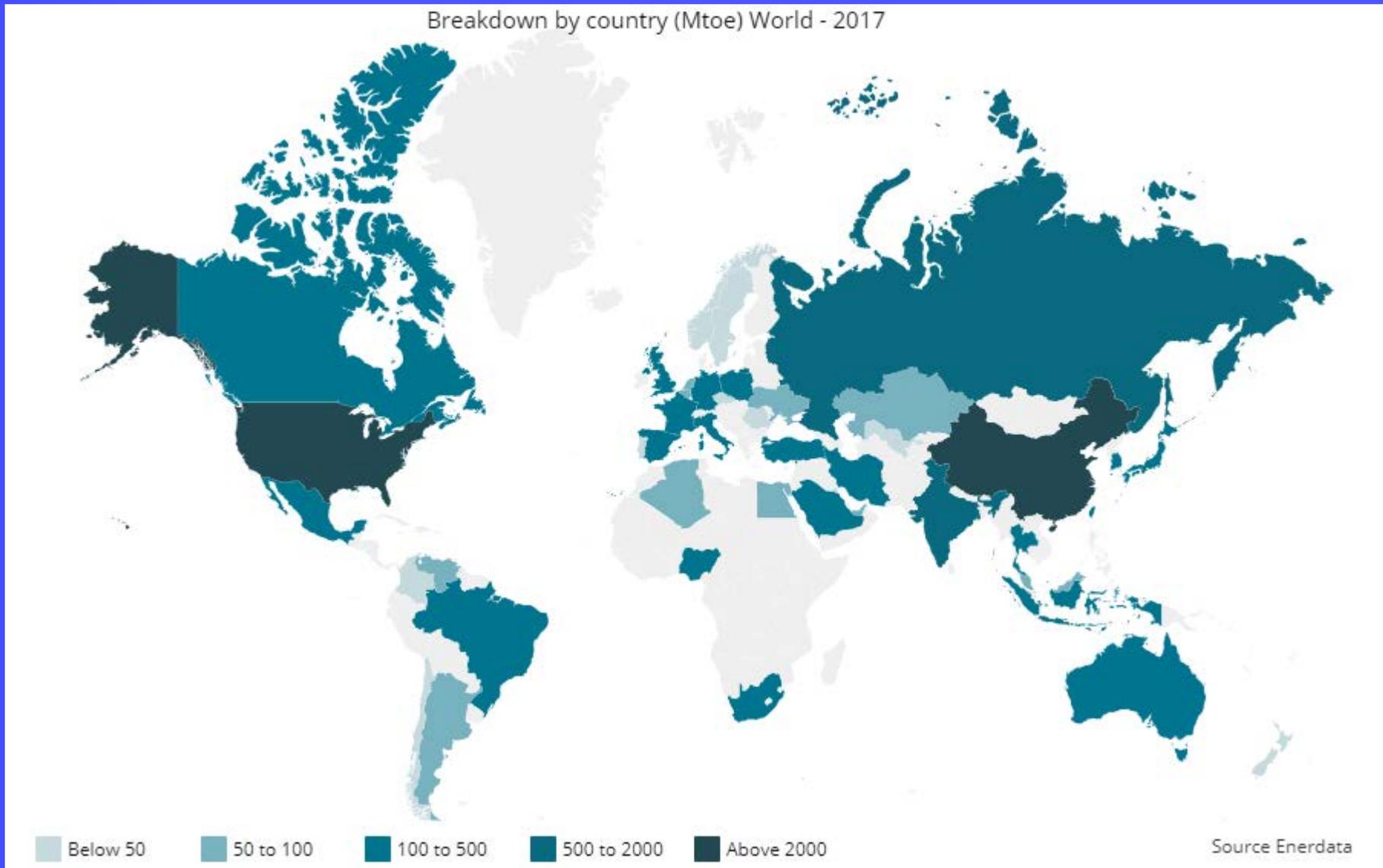


(Fuente: **Global Energy Statistical Yearbook 2017**)

El consumo medio mundial de energía a finales del siglo XX fue de casi 2 toneladas equivalentes de petróleo por persona y año.

1 tonelada equivalente de petróleo = 1 tep ~ 41.9 GJ ~ 11630 kWh.

Consumo energético mundial



Suponiendo una producción de energía mundial al nivel de la de 1995 ($\sim 10^{16}$ MJ/año), habría combustible suficiente para generar esta energía por una planta de fusión durante:

D+T: 3000 años (reservas de Li en la Tierra).
60 millones de años (reservas de Li en el océano).

D+D: 150000 millones de años (deuterio de los océanos).

Para tener referencia de la magnitud de estos números, considérese que la mayoría de las renovables (solar, eólica, hidro, etc.) se basan directa o indirectamente en la energía que llega a la tierra desde el Sol.

Se considera que el Sol es una fuente inagotable, pero se apagará en unos 5000 millones de años.

La edad del universo es de unos 15000 millones de años.

Residuos radioactivos

1. Núcleo del reactor (divertor, primera pared, etc.)-
activación por neutrones de 14MeV, difusión de tritio.
2. Resto de la estructura.-
activación por neutrones de 14 MeV.
 - Inicialmente, más radioactivos que en un reactor de fisión debido a que los neutrones son más energéticos.
 - El uso de materiales de baja activación hace que decaigan rápidamente por debajo de los niveles de radiación de un reactor de fisión (~ 50 años).
 - En 300 años, todos los materiales bajan sus niveles de actividad radioactiva por debajo de la ceniza de carbón.
 - Debido a los “cortos” periodos de tiempo, se pueden tratar en la planta y luego tratarlos adecuadamente.

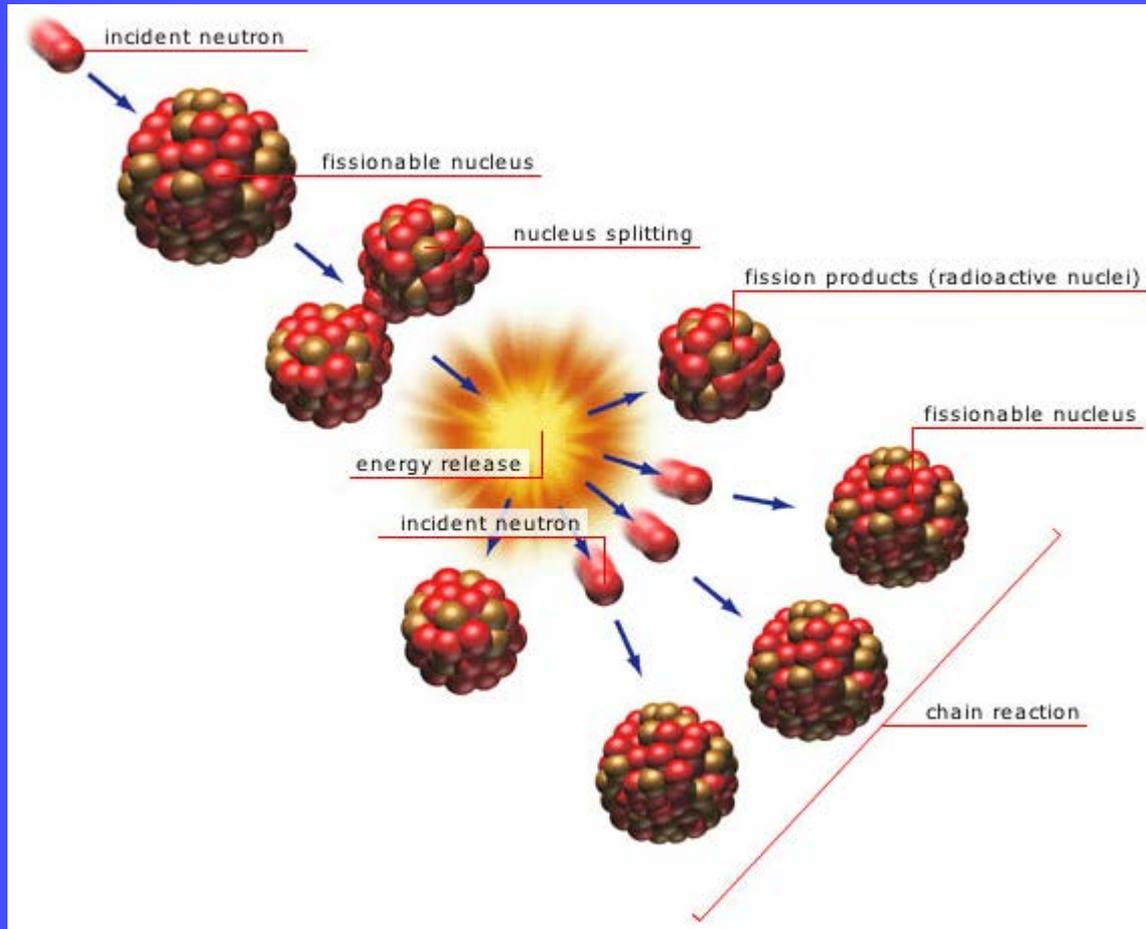


Imposibilidad de accidentes catastróficos, con liberación masiva de material radioactivo de alta actividad.

1. La reacción de fusión NO es una reacción en cadena.
2. Peor accidente (1): liberar Tritio (T) a la atmósfera debido a explosión, o incendio en planta de producción de T (Li es inflamable).
 1. Solo hay 1gr de T en el plasma en funcionamiento.
 2. Hay menos de un total de 1 kg de T en la planta.
 3. Límites estrictos a la acumulación de T en la pared.
 4. Concentración ya por debajo de límites peligrosos muy cerca de la planta.
 5. T decae rápidamente (12 años) y con baja energía (< 15 keV).
 6. Se acumula muy poco en tejidos biológicos (expulsado en orina en 2-3 semanas).
3. Peor accidente (2): apagado de las bobinas superconductoras al revertir rápidamente a su estado normal. Accidente confinado dentro de la planta.



Fisión nuclear: reacción



Neutrones producen
más reacciones:
reacción en cadena



El impacto ambiental, a la salud pública y al cambio climático de una planta de fusión nuclear es bajo.

Estudios de la IAEA la colocan a niveles similares de coste externo de la energía eólica, bastante por debajo de la solar, fisión, y muy por debajo de los combustibles fósiles.

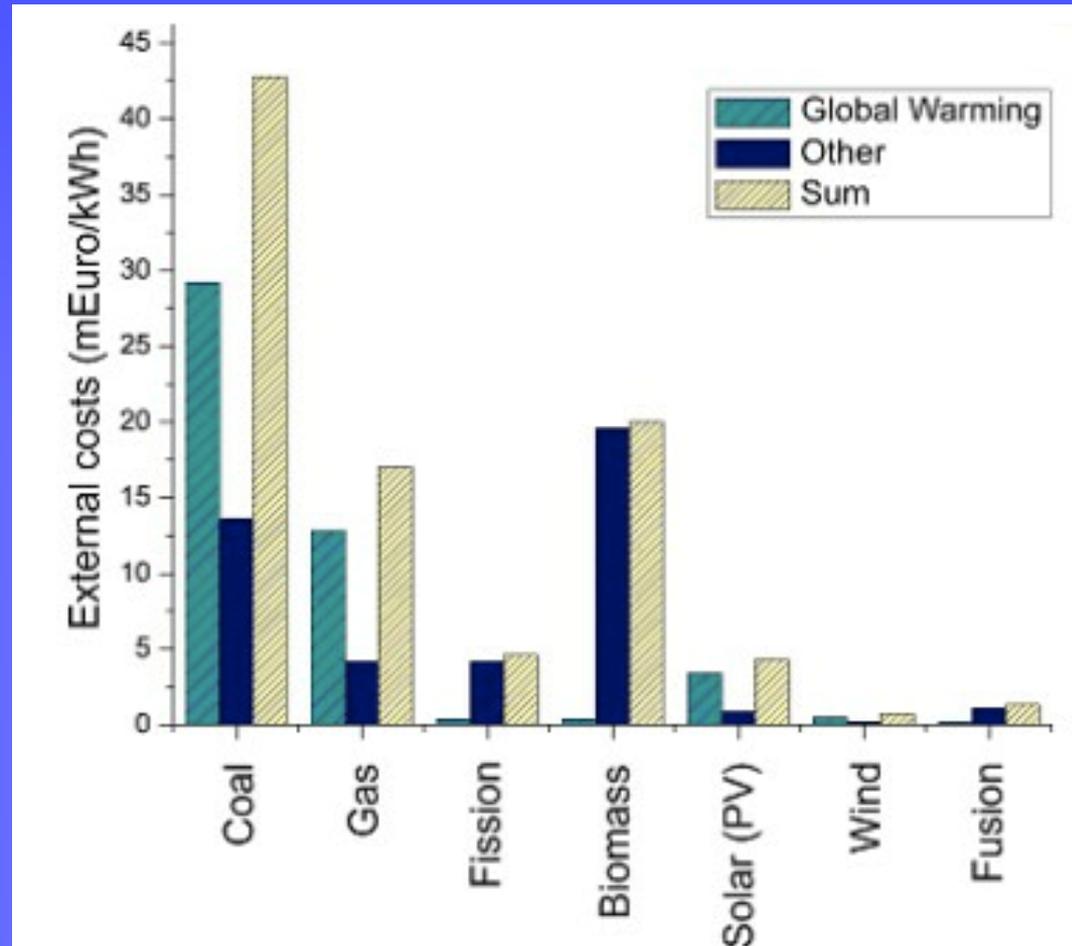
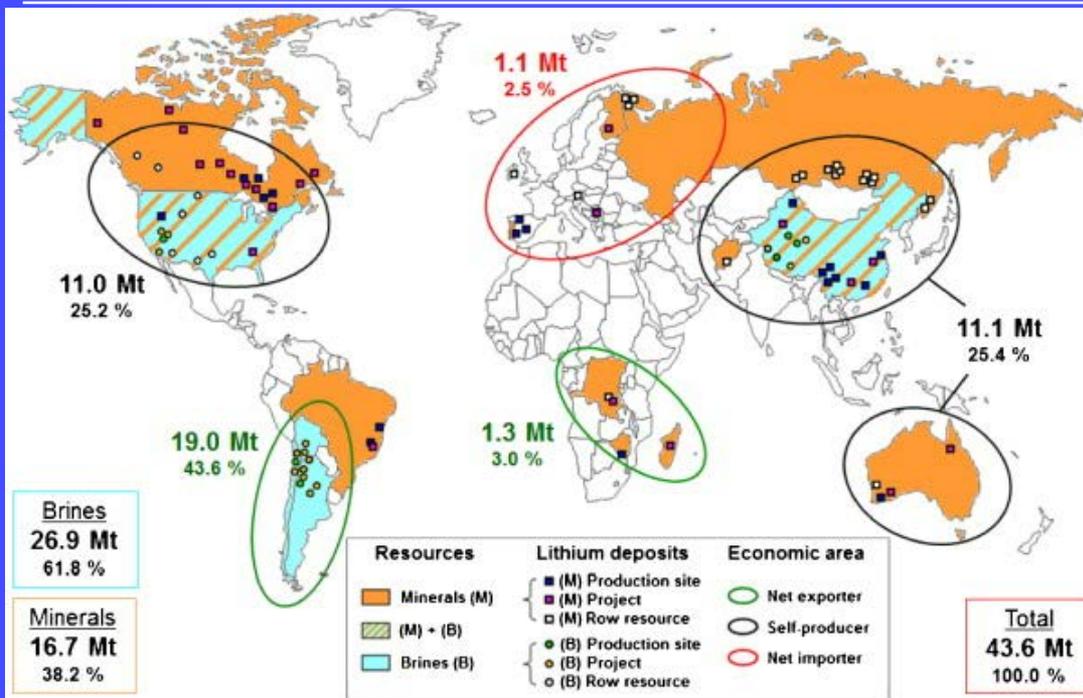


Figure 10: External costs of various energy sources, divided into costs relating to global warming due to the greenhouse effect and other costs, such as the consequences of health damage, industrial accidents and sulphur emissions.

Fusión nuclear: disponibilidad



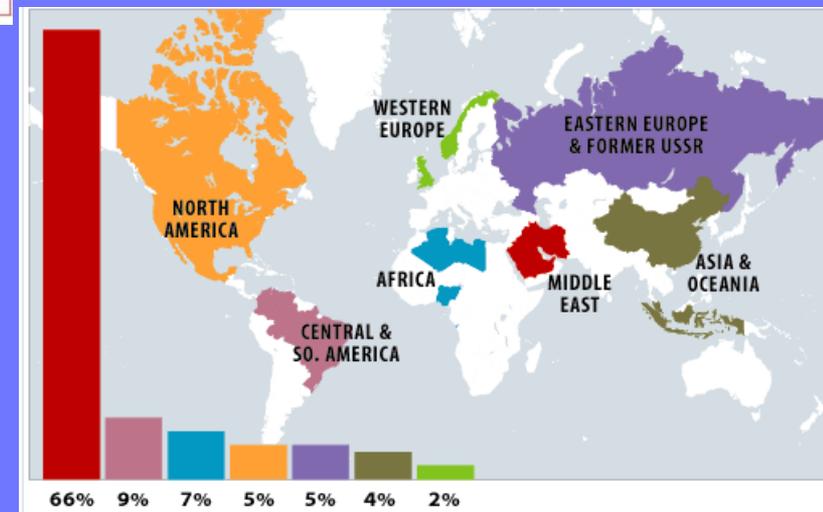
La distribución de Li es muy diferente a la de petróleo.

Cambiaría orden mundial en política energética.



Competencia con otras industrias: pilas eléctricas, química e industria aeronáutica.

También es posible extraer Li del océano, aunque la tecnología es mucho mas cara.



Difícil estimar el coste del Kwh generado por energía de fusión en este punto.

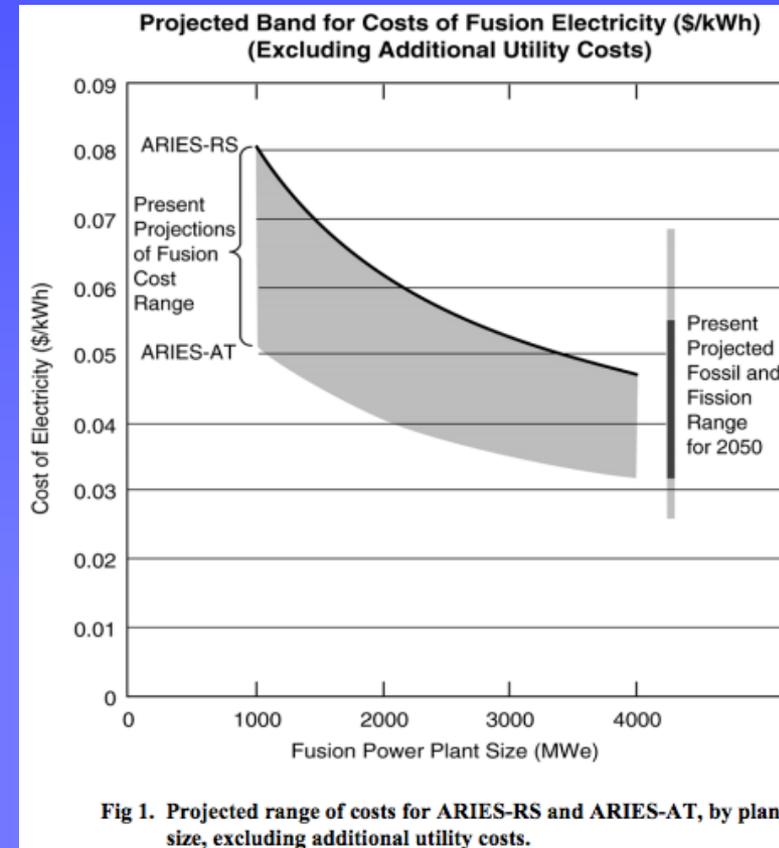
Coste actual medio de la energía es del orden de 15-30 c\$/kWh.

Estimaciones actuales del coste para una planta de fusión de 3GW ~ 3.5-5 c\$/Kwh.

Costes se dividen en: inversión inicial, mantenimiento y operación y combustible.

Perfil de coste de la energía de fusión similar al de la energía de fisión: alta inversión inicial (> 60%), mantenimiento y operación (~35%) y combustible (5%).

Funcionamiento: continuo, aunque con mucha menor inercia que un reactor de fisión.



La energía de fusión está aún lejos de poder ser considerada un elemento del portafolio energético mundial. Sigue siendo un campo de investigación activo.

La energía de fusión es un tipo de energía nuclear.

La energía de fusión es sostenible, relativamente limpia, segura, no contribuye al cambio climático y su precio puede ser competitivo.

ITER y NIF han de demostrar aún la viabilidad de este tipo de energía: ignición, tratamiento de Tritio y otras tecnologías. También estudiar y resolver problemas de ciencia básica y tecnológicos aún pendientes.

La energía de fusión es un “*game-changer*”. Si funciona, cambiará el mundo, y por mucho tiempo. Ese es el único motivo que justifique el que se habrán gastado, a nivel mundial, más de 150,000 millones de Euros en su desarrollo desde 1950 hasta su puesta en marcha a finales del s. XXI.