

Confinamiento magnético en Stellarator

Rafael Jurado Ariza

Grado de Física
Universidad de Córdoba

4 de mayo de 2020

Contenidos

1 Introducción

- Energía
- Fusión nuclear
- Confinamiento magnético

Contenidos

1 Introducción

- Energía
- Fusión nuclear
- Confinamiento magnético

2 Stellarators

- Historia y precedentes
- Clasificación de los *stellarators*
- El *stellarator* heliac flexible TJ-II
- Calentamiento del plasma

Contenidos

1 Introducción

- Energía
- Fusión nuclear
- Confinamiento magnético

2 Stellarators

- Historia y precedentes
- Clasificación de los *stellarators*
- El *stellarator* heliac flexible TJ-II
- Calentamiento del plasma

3 Turbulencia, campos eléctricos e islas magnéticas

- Turbulencia
- El campo eléctrico radial E_r
- Islas magnéticas

1 Introducción

- Energía
- Fusión nuclear
- Confinamiento magnético

2 Stellarators

- Historia y precedentes
- Clasificación de los *stellarators*
- El *stellarator* heliac flexible TJ-II
- Calentamiento del plasma

3 Turbulencia, campos eléctricos e islas magnéticas

- Turbulencia
- El campo eléctrico radial E_r
- Islas magnéticas

Energía

Demanda global de **energía** en crecimiento.

Energía

Demanda global de **energía** en crecimiento.

Principales fuentes de energía producen **efecto invernadero**.

Energía

Demanda global de **energía** en crecimiento.

Principales fuentes de energía producen **efecto invernadero**.

Se precisa de una fuente de energía **limpia**.

Energía

Demanda global de **energía** en crecimiento.

Principales fuentes de energía producen **efecto invernadero**.

Se precisa de una fuente de energía **limpia**.

Las actuales fuentes renovables tienen **inconvenientes**.

Energía

Demanda global de **energía** en crecimiento.

Principales fuentes de energía producen **efecto invernadero**.

Se precisa de una fuente de energía **limpia**.

Las actuales fuentes renovables tienen **inconvenientes**.

La **solución** es la energía nuclear de fusión.

Fusión nuclear

Dos núcleos atómicos con suficiente E_k pueden unirse.

Fusión nuclear

Dos núcleos atómicos con suficiente E_k pueden unirse.

Hay que acelerar los núcleos calentando el gas a muy alta temperatura →
PLASMA.

Fusión nuclear

Dos núcleos atómicos con suficiente E_k pueden unirse.

Hay que acelerar los núcleos calentando el gas a muy alta temperatura →
PLASMA.

La reacción más **prometedora** es $D - T$.

Fusión nuclear

Dos núcleos atómicos con suficiente E_k pueden unirse.

Hay que acelerar los núcleos calentando el gas a muy alta temperatura → **PLASMA**.

La reacción más **prometedora** es $D - T$.



Fusión nuclear

Dos núcleos atómicos con suficiente E_k pueden unirse.

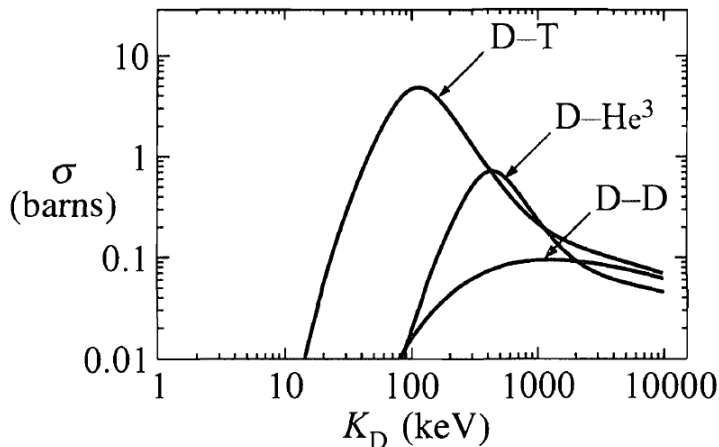
Hay que acelerar los núcleos calentando el gas a muy alta temperatura → **PLASMA**.

La reacción más **prometedora** es $D - T$.



Se debe producir la **ignición**: $nT\tau_e \geq 3 \times 10^{21} \text{ keVs/m}^3$.

Fusión nuclear



Secciones eficaces para las reacciones de fusión D-T, D- ^3He y D-D en función de la energía cinética del deuterón K_D

Confinamiento magnético

Al darle cierta **helicidad** al campo magnético el tiempo de confinamiento aumenta.

Confinamiento magnético

Al darle cierta **helicidad** al campo magnético el tiempo de confinamiento aumenta.

Por el hecho de ser un plasma, los electrones están separados de los iones. Esta **separación** de carga da lugar a campos eléctricos.

Los electrones **oscilan** respecto de los iones por tener masa más pequeña con frecuencia: $\omega_p^2 = \left(\frac{n_e e^2}{\epsilon_0 m_e} \right)^{\frac{1}{2}}$.

Este rápido movimiento de los e^- **apantalla** el desequilibrio de carga.

Confinamiento magnético

Al darle cierta **helicidad** al campo magnético el tiempo de confinamiento aumenta.

Por el hecho de ser un plasma, los electrones están separados de los iones. Esta **separación** de carga da lugar a campos eléctricos.

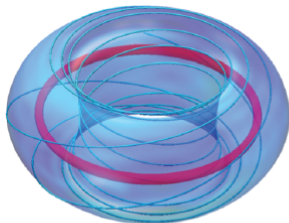
Los electrones **oscilan** respecto de los iones por tener masa más pequeña con frecuencia: $\omega_p^2 = \left(\frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m_e} \right)^{\frac{1}{2}}$.

Este rápido movimiento de los e^- **apantalla** el desequilibrio de carga.

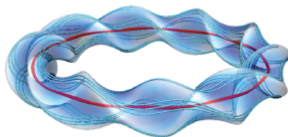
Las partículas cargadas se mueven en un \mathbf{E} y \mathbf{B} genéricos haciendo que los centros de giro tengan **deriva**.

Debido a esta deriva si usamos dispositivos con líneas de campo abiertas hay un rápido *end loss*. Por esto se usa el **toro**.

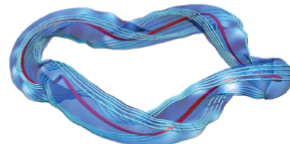
Confinamiento magnético



Tokamak



LHD stellarator



TJ-II stellarator

Usando un toro simple puede haber deriva vertical, pero esto se puede corregir torciendo helicoidalmente las líneas de campo B.

Confinamiento magnético

La **eficiencia** del confinamiento del plasma por el campo magnético se mide por el parámetro plasma beta, definido como la relación entre la presión del plasma y la presión magnética:

$$\beta = \frac{\langle p \rangle}{B^2/2\mu_0}$$

1 Introducción

- Energía
- Fusión nuclear
- Confinamiento magnético

2 Stellarators

- Historia y precedentes
- Clasificación de los *stellarators*
- El *stellarator* heliac flexible TJ-II
- Calentamiento del plasma

3 Turbulencia, campos eléctricos e islas magnéticas

- Turbulencia
- El campo eléctrico radial E_r
- Islas magnéticas

Historia y precedentes

Lyman Spitzer introdujo el concepto de *stellarator* en 1951.

Historia y precedentes

Lyman Spitzer introdujo el concepto de *stellarator* en 1951.

El primero fue construido en Princeton, pero no tuvo éxito. Mientras tanto los rusos presentaban su concepto de confinamiento *tokamak* en la IAEA 1968.

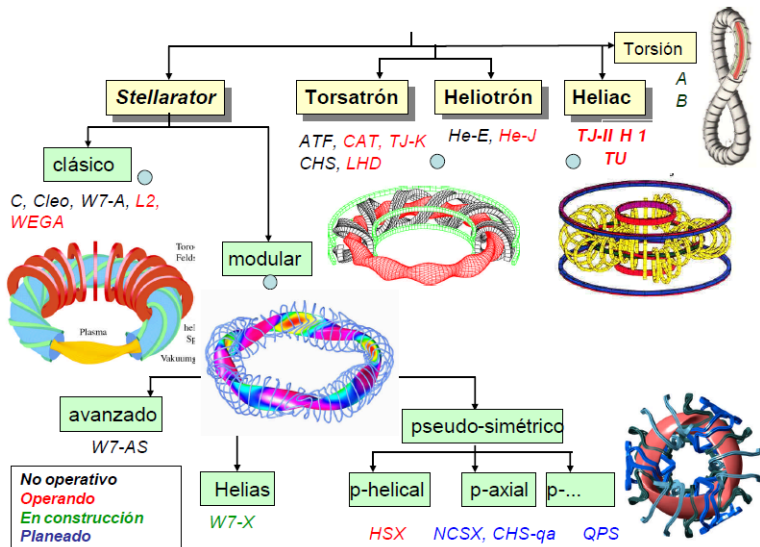
Historia y precedentes

Lyman Spitzer introdujo el concepto de *stellarator* en 1951.

El primero fue construido en Princeton, pero no tuvo éxito. Mientras tanto los rusos presentaban su concepto de confinamiento *tokamak* en la IAEA 1968.

El reactor ruso conseguía resultados superiores. Esta situación dio lugar al hecho histórico de que los *tokamaks* se convirtieron en la principal línea de investigación para la fusión nuclear por confinamiento magnético.

Clasificación de los stellarators



El *stellarator* heliac flexible TJ-II

Sus características fundamentales son:

El *stellarator* heliac flexible TJ-II

Sus características fundamentales son:

- 1 Poseer el potencial suficiente para operar en regímenes de **alta beta** ($\langle \beta \rangle \approx 2\%$).

El *stellarator* heliac flexible TJ-II

Sus características fundamentales son:

- 1 Poseer el potencial suficiente para operar en regímenes de **alta beta** ($\langle \beta \rangle \approx 2\%$).
- 2 Tener una elevada **flexibilidad** magnética. Su transformada rotacional puede variar en un amplio rango.

El *stellarator* heliac flexible TJ-II

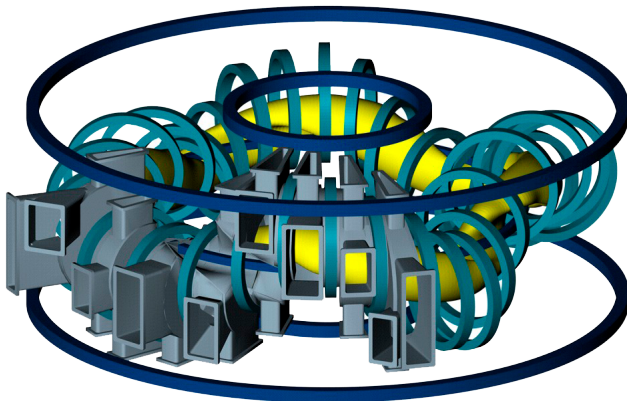
Sus características fundamentales son:

- 1 Poseer el potencial suficiente para operar en regímenes de **alta beta** ($\langle \beta \rangle \approx 2\%$).
- 2 Tener una elevada **flexibilidad** magnética. Su transformada rotacional puede variar en un amplio rango.
- 3 La sección poloidal del plasma tiene forma de **alubia** (configuración heliac).

El *stellarator* heliac flexible TJ-II

PARÁMETRO	VALOR
Número de períodos	$n = 4$
Número de bobinas TF	32
Radio mayor (m)	$R_0 = 1.5$
Radio menor medio (m)	$\langle a \rangle \leq 0.2$
Campo magnético (T)	$B \leq 1$
Transformada rotacional	$\iota(0) \approx 0.9 - 2.2$
Densidad electrónica (ECRH) (m^{-3})	$n_{e,\text{max}}^{\text{ECRH}} \approx 1.5 \times 10^{19}$
Densidad electrónica (NBI) (m^{-3})	$n_{e,\text{max}}^{\text{NBI}} \approx 8 \times 10^{19}$
Temperatura electrónica máxima (keV)	$T_e \approx 2$
Temperatura iónica (eV)	$T_i \approx 150$

El *stellarator* heliac flexible TJ-II



Vista en perspectiva del TJ-II. En amarillo el plasma, en azul claro las bobinas toroidales y en azul oscuro, las radiales.

Calentamiento del plasma

Los plasmas utilizados en investigación de fusión nuclear poseen un alto grado de **ionización** para poder ser confinados magnéticamente. Para alcanzar esto, se ha de aportar **energía** al gas inicial.

Calentamiento del plasma

Los plasmas utilizados en investigación de fusión nuclear poseen un alto grado de **ionización** para poder ser confinados magnéticamente. Para alcanzar esto, se ha de aportar **energía** al gas inicial.

Se pueden calentar usando diversos métodos:

Calentamiento del plasma

Los plasmas utilizados en investigación de fusión nuclear poseen un alto grado de **ionización** para poder ser confinados magnéticamente. Para alcanzar esto, se ha de aportar **energía** al gas inicial.

Se pueden calentar usando diversos métodos:

- 1 Neutral Beam Injector (NBI).

Calentamiento del plasma

Los plasmas utilizados en investigación de fusión nuclear poseen un alto grado de **ionización** para poder ser confinados magnéticamente. Para alcanzar esto, se ha de aportar **energía** al gas inicial.

Se pueden calentar usando diversos métodos:

- 1 Neutral Beam Injector (NBI).
- 2 Electron Cyclotron Resonant Heating (ECRH).

Calentamiento del plasma

Los plasmas utilizados en investigación de fusión nuclear poseen un alto grado de **ionización** para poder ser confinados magnéticamente. Para alcanzar esto, se ha de aportar **energía** al gas inicial.

Se pueden calentar usando diversos métodos:

- 1 Neutral Beam Injector (NBI).
- 2 Electron Cyclotron Resonant Heating (ECRH).

Ambos con sus ventajas e inconvenientes.

1 Introducción

- Energía
- Fusión nuclear
- Confinamiento magnético

2 Stellarators

- Historia y precedentes
- Clasificación de los *stellarators*
- El *stellarator* heliac flexible TJ-II
- Calentamiento del plasma

3 Turbulencia, campos eléctricos e islas magnéticas

- Turbulencia
- El campo eléctrico radial E_r
- Islas magnéticas

Turbulencia

Para alcanzar el triple producto de Lawson hay que incrementar el **tiempo de confinamiento**.

Turbulencia

Para alcanzar el triple producto de Lawson hay que incrementar el **tiempo de confinamiento**.

Una **reducción** de la turbulencia aumentaría el tiempo de confinamiento.

Turbulencia

Para alcanzar el triple producto de Lawson hay que incrementar el **tiempo de confinamiento**.

Una **reducción** de la turbulencia aumentaría el tiempo de confinamiento.

La descripción matemática de los fluidos viene de las ecuaciones de **Navier-Stokes**.

Turbulencia

Para alcanzar el triple producto de Lawson hay que incrementar el **tiempo de confinamiento**.

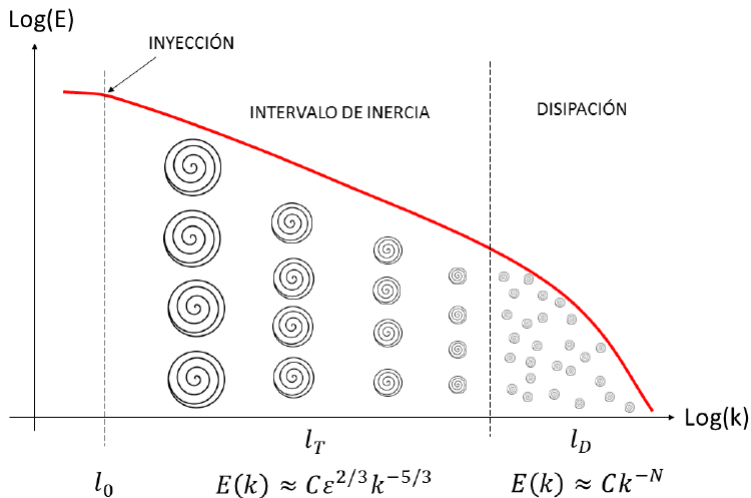
Una **reducción** de la turbulencia aumentaría el tiempo de confinamiento.

La descripción matemática de los fluidos viene de las ecuaciones de **Navier-Stokes**.

Para **clasificar** el régimen del fluido, se puede utilizar el número de Reynolds (Re):

$$Re = \frac{v_s \cdot D}{\nu}$$

Espectro de la turbulencia



Espectro de la turbulencia según la teoría K-41.

Generación de la turbulencia

La turbulencia suele estar producida por fuentes de energía libre tales como los gradientes, las corrientes, etc.

Generación de la turbulencia

La turbulencia suele estar producida por fuentes de energía libre tales como los gradientes, las corrientes, etc.

Un modelo ampliamente aceptado de las inestabilidades que inician la turbulencia en el plasma es el modelo de inestabilidad producido por ola de deriva.

Generación de la turbulencia

La turbulencia suele estar producida por fuentes de energía libre tales como los gradientes, las corrientes, etc.

Un modelo ampliamente aceptado de las inestabilidades que inician la turbulencia en el plasma es el modelo de inestabilidad producido por ola de deriva.

En los plasmas de fusión existen fundamentalmente dos modos de inestabilidades de este tipo: el modo de inestabilidad ITG y el ETG.

El campo eléctrico radial E_r

El efecto que tiene la turbulencia en el plasma es el de **degradar** el confinamiento.

El campo eléctrico radial E_r

El efecto que tiene la turbulencia en el plasma es el de **degradar** el confinamiento.

Cabe pensar que las pérdidas producidas por la turbulencia son **proporcionales** a la energía inyectada en el plasma.

El campo eléctrico radial E_r

El efecto que tiene la turbulencia en el plasma es el de **degradar** el confinamiento.

Cabe pensar que las pérdidas producidas por la turbulencia son **proporcionales** a la energía inyectada en el plasma.

En 1982 fue descubierto en ASDEX (Alemania) un modo de alto confinamiento en plasmas (modo H).

El campo eléctrico radial E_r

El efecto que tiene la turbulencia en el plasma es el de **degradar** el confinamiento.

Cabe pensar que las pérdidas producidas por la turbulencia son **proporcionales** a la energía inyectada en el plasma.

En 1982 fue descubierto en ASDEX (Alemania) un modo de alto confinamiento en plasmas (modo H).

Los campos eléctricos radiales juegan un papel muy importante en el confinamiento magnético de plasmas, dado que **facilitan** la transición a modo H.

Islas magnéticas

Cuando se habla de confinamiento en plasmas de fusión, uno de los términos más utilizados es Internal Transport Barriers (ITB). Hace referencia a barreras que **impiden** el transporte de energía y/o partículas.

Islas magnéticas

Cuando se habla de confinamiento en plasmas de fusión, uno de los términos más utilizados es Internal Transport Barriers (ITB). Hace referencia a barreras que **impiden** el transporte de energía y/o partículas.

Resultados en el Rijnhuizen Tokamak Project, sugieren que las **islas magnéticas** constituyen una barrera del transporte, lo cual encaja con observaciones realizadas en TJ-II y LHD.

Islas magnéticas

Cuando se habla de confinamiento en plasmas de fusión, uno de los términos más utilizados es Internal Transport Barriers (ITB). Hace referencia a barreras que **impiden** el transporte de energía y/o partículas.

Resultados en el Rijnhuizen Tokamak Project, sugieren que las **islas magnéticas** constituyen una barrera del transporte, lo cual encaja con observaciones realizadas en TJ-II y LHD.

En una investigación realizada en el stellarator Wendenstein 7-AS se observó que al realizar la transición al modo H en presencia de islas, el **aumento** del tiempo de confinamiento era del 35 %.

Conclusions

There is no consensus on whether any of the instruments described in this text improve or not the confinement of plasma in nuclear fusion stellarator reactors since both the technology used and much of the theory are in the development phase.

We can indeed conclude that magnetic islands are a hopeful avenue if we can correctly apply its concept. Various numerical studies based on the magnetohydrodynamics (MHD) show that the success of nuclear fusion as stable source of energy and for everyone, is getting closer and closer; an example of this is the ITER tokamak under construction in Cadarache (France).

¡Gracias por vuestra atención!