

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

Facultad de Ciencias

Grado de Física

Trabajo Física del Plasma

Islas magnéticas en Stellarator

Autor: Rafael Jurado Ariza



28 de abril de 2020

"La ciencia no puede resolver el último misterio de la naturaleza. Y eso se debe a que, en última instancia, nosotros mismos somos una parte del misterio que estamos tratando de resolver."

Max Planck

Resumen

El presente trabajo describe el concepto de isla magnética, en particular en el reactor tipo Stellarator, y analiza si su existencia es favorable o adversa al confinamiento del plasma en el reactor.

En primer lugar se presenta una introducción a la energía nuclear, particularizando en la de fusión, continúa un análisis al concepto de confinamiento y su duración así como métodos que lo aumentaron o fenómenos físicos que lo reducen y termina con medidas de interés dentro del plasma y sus aplicaciones en la mejora del confinamiento.

En segundo lugar se toma contacto en profundidad con los reactores tipo Stellarator, pasando por su historia, conceptos fundamentales y terminar con el Stellarator español en el CIEMAT: TJ-II.

En última instancia se realiza un análisis más exhaustivo del concepto de turbulencia con el apoyo de herramientas matemáticas como el campo eléctrico, finalizando con la fijación del concepto de isla magnética y su medición.

Palabras clave: plasma, Stellarator, isla, magnética

Abstract

This paper describes the concept of magnetic island, in particular in the Stellarator type reactor, and analyzes whether its existence is favorable or adverse to the confinement of the plasma in the reactor.

First, there is an introduction to nuclear energy, particularly in the field of fusion, which continues an analysis of the concept of confinement and its duration as well as methods that increase it or physical phenomena that reduce it and end up with measures of interest within plasma and its applications in improving confinement.

Secondly, the Stellarator-type reactors are contacted in depth, passing through their history, fundamental concepts and ending with the Spanish Stellarator at CIEMAT: TJ-II.

Ultimately, a more comprehensive analysis of the concept of turbulence is carried out with the support of mathematical tools such as the electric field, ending with the establishment of the island concept and its measurement.

Keywords: plasma, Stellarator, island, magnetic

Índice general

Índice de figuras	V
Índice de tablas	VI
1. Introducción	1
1.1. Energía	1
1.2. Fusión nuclear	2
Bibliografía	5

Índice de figuras

1.1. Energía de enlace	2
1.2. Secciones eficaces en reacciones de fusión	3

Índice de tablas

Capítulo 1

Introducción

1.1. Energía

La demanda global energética está aumentando en los últimos años principalmente debido al crecimiento demográfico y económico. El continuo desarrollo de la sociedad moderna requiere que las fuentes de energía sean sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Sin embargo, hoy en día más del 80 % de la energía mundial proviene de combustibles fósiles [1], incluyendo carbón, petróleo y gas natural, que están limitados en reserva. Además, las emisiones de CO₂ de este tipo de energía es la principal contribución al aumento del efecto invernadero y tiene un efecto importante en el cambio climático. Se sabe que para nuestro entorno de vida el nivel asequible de aumento de la temperatura media por encima de los niveles antes de la era industrial es de 2 °C, más allá del cual es irreversible y casi se espera que ocurra un cambio climático catastrófico e incontrolable. Este aumento ya ha alcanzado los 0.78 °C[2]. Por lo tanto, es urgente encontrar una manera de reducir la energía relacionada con los combustibles fósiles. Un alivio a corto plazo sería el desarrollo de nuevas tecnologías para reducir las emisiones de CO₂ de las plantas de energía fósil y mejorar el almacenamiento de CO₂ a gran escala, mientras que una solución a largo plazo debería considerar las alternativas a los combustibles fósiles. Los candidatos con recursos suficientes para hacerse cargo del abastecimiento son la energía solar, la fisión nuclear y la fusión nuclear [3].

La energía solar es teóricamente amplia e inagotable, pero su intermitencia (luz solo en días sin nubes) y la baja densidad energética (se requiere una gran superficie) hacen difícil construir una planta de energía solar para producir una cantidad significativa de energía base. La fisión nuclear es una fuente de energía bien establecida y ha estado produciendo electricidad de carga base durante décadas. Sin embargo, la eliminación de los residuos nucleares de larga y media vida junto al riesgo de accidente debido a la reacción en cadena intrínseca de la fisión nuclear ha sido durante mucho tiempo una preocupación pública.

La fusión nuclear promete una solución limpia y segura para nuestras necesidades energéticas a largo plazo [3]. Primero, las reservas de combustible son abundantes. Para la



Figura 1.1. Energía de enlace promedio en función del número másico.

reacción se necesitan deuterio y tritio, el deuterio puede ser extraído del agua de mar; el tritio no se produce de forma natural, pero puede ser obtenido a partir del isótopo de litio 6Li . Segundo, las reacciones de fusión nuclear no emiten gases de efecto invernadero o cualquier otro daño químico a la atmósfera. Tercero, la fusión nuclear es intrínsecamente segura. El combustible de fusión se introduce continuamente en el reactor a una velocidad que sostiene la reacción durante sólo unas pocas decenas de segundos en cada instante. La reacción de fusión sólo puede ocurrir bajo una temperatura muy alta y un campo de confinamiento suficientemente preciso y sin reacción en cadena. Cualquier manipulación incorrecta detendrá la reacción.

1.2. Fusión nuclear

Los protones y neutrones en el núcleo se mantienen unidos por la fuerza nuclear de corto alcance. La energía requerida para desmontar un núcleo se llama energía de enlace. La figura 1.1 muestra que el promedio de la energía de enlace varía entre elementos; tanto los núcleos más ligeros como los más pesados tienen un promedio bajo y los núcleos de masa intermedia tienen la mayor energía de unión. Esto muestra que la energía nuclear puede obtenerse tanto por la división de núcleos pesados (fisión) como fusionando los núcleos ligeros (fusión).

Para lograr una reacción de fusión, dos núcleos necesitan ganar suficiente energía cinética como para superar la repulsión de Coulomb y alcanzar el régimen de fuerza nuclear de corto alcance. La primera fusión se realizó experimentalmente bombardeando sobre un deuterio objetivo (2H o D) con un rayo de deuterio [4], justo después del descubrimiento del deuterio (el isótopo de hidrógeno de masa dos [5]). Fue durante estos experimentos que el tercer isótopo de hidrógeno, el tritio (3H o T), se descubrió. Después de este logro, el uso de

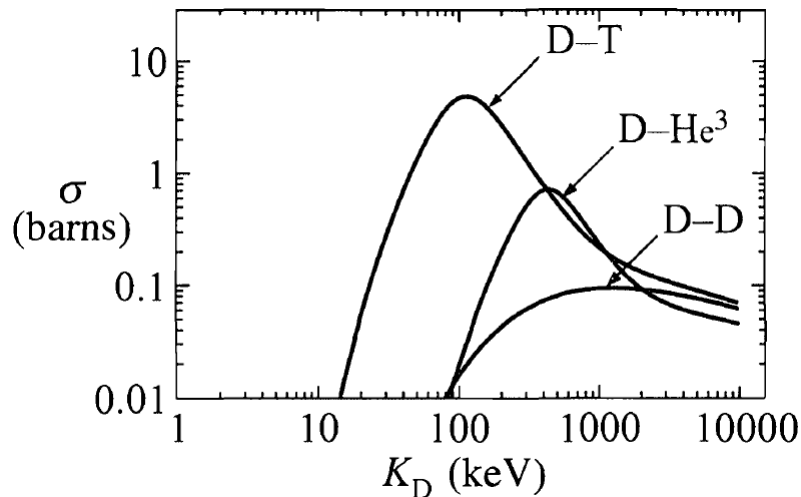
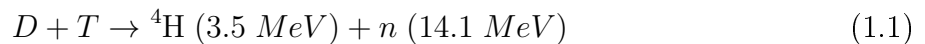


Figura 1.2. Secciones eficaces para las reacciones de fusión D-T, D-³He y D-D en función de la energía cinética del deuterón K_D [3].

la fusión nuclear como fuente de energía fue considerado. Sin embargo, se reconoció que bombardear un objetivo con un chorro acelerado de partículas no es factible para la generación de energía, porque la energía utilizada para la aceleración de la partícula es mucho mayor que la energía producida por la reacción de fusión nuclear y la mayoría de las partículas aceleradas no daban en el objetivo.

Hoy en día se acepta generalmente que la forma más factible para la producción efectiva de energía con fusión nuclear es calentar los combustibles de fusión a alta temperatura, para que las partículas se acerquen con un fuerte movimiento térmico y una reacción nuclear pueda tener lugar. A tan alto nivel de temperatura, los combustibles de fusión están ionizados y en un estado llamado plasma. La figura 1.2 muestra las secciones transversales (probabilidad de que ocurra una reacción nuclear) de diferentes reacciones nucleares. Podemos ver que la reacción más prometedora es entre el deuterio y el tritio produciendo el neutrón y una partícula α .



La energía producida es transportada como energía cinética por el neutrón y la partícula α .

Uno de los objetivos fundamentales para obtener energía de fusión es mantener la alta temperatura, no con el calentamiento externo sino con la energía producida por la reacción nuclear en sí. Este proceso se llama ignición. Para alcanzar la ignición, el criterio de Lawson [6] predice que debe cumplirse la siguiente condición:

$$nT\tau_e \geq 3 \times 10^{21} \text{ keVs/m}^3 \quad (1.2)$$

donde n es la densidad del plasma, T es la temperatura y τ_e es el tiempo de confinamiento produciendo energía. Este triple producto sugiere que para generar energía de forma efectiva a

partir de la fusión nuclear, el plasma necesita estar confinado a muy alta temperatura por un tiempo suficientemente largo con alta densidad. Hay principalmente dos formas de conseguir energía de fusión controlada: el confinamiento magnético y el confinamiento inercial. Este trabajo se centra en la primera de ellas.

Bibliografía

- [1] AGENCY, I. E., *World Energy Outlook 2019*, World Energy Outlook, OECD, 2019.
- [2] STOCKER, T. F., QIN, D., PLATTNER, G.-K., et al., *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp. 3–29, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2013.
- [3] FREIDBERG, J. P., *Plasma physics and fusion energy*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, 2008.
- [4] OLIPHANT, M. L. E., HARTECK, P., and RUTHERFORD, E., Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character **144** (1934) 692.
- [5] UREY, H. C., BRICKWEDDE, F. G., and MURPHY, G. M., Phys. Rev. **40** (1932) 1.
- [6] LAWSON, J. D., Proceedings of the Physical Society. Section B **70** (1957) 6.