

# LA FUSIÓN: Física de una fuente de energía fundamental

Las reacciones de fusión son las que liberan la energía que alimenta el Sol y las estrellas. Para producir esta energía hay que confinar plasmas de muy alta temperatura durante un tiempo lo suficientemente largo. Los resultados de la investigación en física de plasmas permiten reproducir en la Tierra las condiciones que requiere la fusión termonuclear controlada. El objetivo de esta investigación es, a largo plazo, el abastecimiento de energía, como complemento de otras fuentes energéticas, para hacer frente a necesidades futuras. Sobre un fondo que representa el Sol y la Tierra, este cartel explora los distintos temas que interesan a la fusión: su relación con otras formas de energía, la física de las reacciones de fusión, el confinamiento y el calentamiento de los plasmas, así como los adelantos de la investigación en este campo.

## Producción y transformación de energía

La sociedad moderna está basada en la disponibilidad de numerosas fuentes de energía y en la conversión de esta energía en una forma directamente utilizable. En las centrales la energía se produce en forma de calor por reacciones exotérmicas, ya sean químicas, de fisión nuclear o – en el futuro – de fusión. Esta energía térmica se transforma a continuación en procesos que obedecen a las leyes de la termodinámica. La eficacia de esta conversión está limitada por la segunda ley de la termodinámica: inevitablemente una parte de la energía y de los reactivos no se puede recuperar y se pierde en el entorno. La energía generada por kilogramo de reactivo es más importante en el caso de las reacciones nucleares que en el de las químicas, como se indica en el reverso. En el caso más verosímil para una central de fusión de primera generación, la reacción que se utilice será la de fusión de un deuterio, muy abundante en la Tierra, con el tritio. Este se puede producir a partir del litio en el propio reactor. El litio absorbe los neutrones procedente de la reacción D-T y se desintegra en tritio y helio. Los verdaderos reactivos serán entonces el deuterio y el litio. El producto de la reacción será el helio.

## Producción de energía por reacciones de fusión

La reacción  $\Delta E = (m_i - m_f)c^2$  relaciona la energía liberada  $\Delta E$  con la diferencia de masa de los reactivos ( $m_i$ ) y los productos de la reacción ( $m_f$ ). La energía de enlace de un núcleo es la diferencia entre la masa del núcleo y la suma de las masas de los nucleones (protones y neutrones) que lo constituyen. La forma del gráfico que da la energía de enlace por nucleón, muestra que combinando (fusionando) elementos ligeros se obtiene un núcleo con energía de enlace por nucleón más elevada. De esta manera se libera energía. Para los elementos con masa elevada (superior a 62 nucleones) al dividir su núcleo más pequeñas (fisión) se obtienen núcleos con menor masa atómica, liberándose también energía. Pero como la pendiente de la curva es más pronunciada en el caso de fusión, la energía liberada por nucleón es mayor

que en el de fisión. Se muestran de forma esquemática las características de dos procesos de fusión importantes: el ciclo protón-protón, que es la fuente primigenia del Sol, y la reacción D-T que se utilizará en los reactores de fusión de primera generación. La tasa de reacciones de fusión depende fuertemente de la temperatura iónica. Para que la atracción nuclear, muy fuerte pero de corto alcance, sea mayor que la de repulsión de los núcleos, ambos con carga eléctrica positiva, la distancia entre los núcleos tiene que ser menor de  $10^{-15}$  m. Para ello se necesita alcanzar las temperaturas extremadamente elevadas indicadas en la curva. La diferencia entre las tasas de los procesos considerados explica también por qué se prefiere la reacción D-T al ciclo protón-protón para aplicaciones terrestres.

## El plasma, cuarto estado de la materia

Los plasmas, conjuntos de partículas con carga eléctrica que se mueven libremente, existen en circunstancias muy distintas y abarcan un rango muy amplio de temperaturas y densidades. La física del plasma es la base de nuestro conocimiento del Sol y las estrellas, de los espacios interestelares, las galaxias, los anuncios publicitarios de neón, los relámpagos y las auroras boreales, así como de las reacciones de fusión termonuclear controlada. Las interacciones eléctricas de largo alcance entre iones y electrones y los campos magnéticos externos o creados por corrientes eléctricas internas son los que dominan el plasma. La dinámica de estos sistemas es compleja y debe ser bien comprendida para permitir el desarrollo de la energía de fusión.

## Condiciones que requiere la fusión controlada.

Para hacer de la fusión una fuente de energía que se pueda utilizar, hay que mejorar las técnicas de calentamiento y el confinamiento del plasma. En el caso de plasma D-T, que tienen que alcanzar temperaturas de 100 millones de grados, los métodos de confinamiento más prometedores son la vía de confinamiento magnético y la de confinamiento inercial. El tokamak es un dispositivo toroidal que está formado por una cámara de vacío tórica (en forma de anillo) en la cual el plasma se confina por la acción conjunta de un campo magnético externo y un campo magnético interno generado por una corriente circulante en el plasma. Este es un ejemplo de la primera técnica, el confinamiento magnético. Actualmente se está investigando intensamente en otro tipo de dispositivo, en el cual el campo magnético se genera con bobinas externas, son los stellarators. En la vía inercial, una diminuta cápsula de vidrio, que contiene una mezcla D-T se comprime bajo la acción de haces de iones o láseres muy intensos de tal manera que se obtengan densidades y temperaturas extremadamente elevadas. De esta manera se consiguen reacciones de fusión en un tiempo muy corto durante el cual esta cápsula implosiona y queda confinada por efecto de su propia inercia.

Para alcanzar la fusión controlada, un plasma de muy alta temperatura tiene que ser confinado a muy alta densidad durante un tiempo lo suficientemente largo. Este criterio se expresa en términos de calidad del confinamiento: el producto de la densidad del plasma y del tiempo de confinamiento de la energía. Los experimentos más avanzados han producido ya plasmas en los cuales la temperatura, la densidad o el tiempo de confinamiento de la energía se acerca o incluso sobrepasa los valores requeridos para obtener reacciones de fusión autosostenidas, pero estos tres valores no se han alcanzado simultáneamente.

## Datos complementarios, información reciente y material educativo en Internet (World Wide Web)

<b>Fusion Education Project Home Page:</b>	<a href="http://FusEdWeb.pppl.gov/CPEP/Chart.html">http://FusEdWeb.pppl.gov/CPEP/Chart.html</a>
<b>CPEP Home Page:</b>	<a href="http://pdg.lbl.gov/cpep.html">http://pdg.lbl.gov/cpep.html</a>
<b>CPEP Product Information:</b>	<a href="http://pdg.lbl.gov/cpep/cpep_how_to_order.html">http://pdg.lbl.gov/cpep/cpep_how_to_order.html</a>
<b>CIEMAT Homepage:</b>	<a href="http://www-fusion.ciemat.es/">http://www-fusion.ciemat.es/</a>
<b>TEC-Homepages</b>	
FZJ/IPP Juelich:	<a href="http://www.fz-juelich.de/ipp/">http://www.fz-juelich.de/ipp/</a>
ERM-KMS Brussels:	<a href="http://fusion.rma.ac.be/">http://fusion.rma.ac.be/</a>
FOM Rijnhuizen:	<a href="http://www.rijnh.nl/">http://www.rijnh.nl/</a>

Estas páginas enlazan con diferentes instituciones y organismos activos en el campo de la fusión controlada.

---

El “**Contemporary Physics Education Project**” (CPEP) es una asociación sin afán de lucro, de físicos y profesores. Su material educativo recoge los conocimientos científicos actuales y destaca los descubrimientos importantes de los últimos treinta años. El CPEP patrocina así mismo numerosos talleres para profesores. Para más información consultar el correo electrónico (e-mail) en la siguiente dirección: [pdg@lbl.gov](mailto:pdg@lbl.gov) o por internet en la dirección arriba reseñada. El CPEP produce constantemente material didáctico nuevo. El material puede encargarse en Science Kit, 777 East Park Drive, Tonawanda, NY 14150 USA, Teléfono +1-800-828-7777, Telefax +1-716-874-9572.

El programa de fusión por confinamiento magnético de la **Asociación Euratom-CIEMAT**, creada en 1986, y actualmente LABORATORIO NACIONAL DE FUSIÓN POR CONFINAMIENTO MAGNÉTICO se inició a comienzos de los años 80 y actualmente se centra en torno a un dispositivo de tipo stellarator: el heliac flexible TJ-II ( $B_0 = 1.0$  T, diámetro 5 m, diámetro de plasma 0.45 m, calentamiento ECRH y NBI). El TJ-II ha producido los primeros plasmas con calentamiento a la frecuencia ciclotrónica de los electrones en Diciembre de 1997. Varias universidades españolas participan en las actividades europeas de seguimiento del programa de fusión por confinamiento magnético e inercial dentro de la Asociación Euratom-Ciemat. Para más información consultar la página de internet <http://www-fusion.ciemat.es>.

El “**Trilateral Euregio Cluster**” (TEC) es una asociación de centros de investigación de Bélgica, Holanda y Alemania : el “Laboratoire de Physique des Plasmas-Laboratorium voor Plasmafysica de l’Ecole Royale Militaire-Koninklijke Militaire School (ERM-KMS)” en Bruselas; el “FOM-Instituut voor Plasmafysica Rijnhuizen” en Nieuwegein; y el “Institut für Plasmaphysik” del centro de investigación de Jülich. Se puede solicitar ejemplares adicionales de este cartel (en francés, neerlandés, alemán, español, portugués o italiano) en el “Institut für Plasmaphysik”, Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 Jülich, Telefax +49-2461-615452.