

Física del plasma y fusión nuclear controlada

por M. Leiser*

Los adelantos registrados últimamente a nivel mundial en el campo de la investigación sobre fusión termonuclear controlada han sido rápidos e importantes y hoy día se consideran excelentes las perspectivas de desarrollo de la fusión como fuente de energía. Dado que la fusión es una de las pocas opciones energéticas viables para el futuro, es importante a todos los efectos demostrar cuanto antes la factibilidad técnica de la energía de fusión.

La cantidad estimada que se gasta anualmente en el mundo en investigaciones sobre fusión es de 2500 millones de dólares de los Estados Unidos. Sin embargo, hasta el segundo decenio del próximo siglo no se construirá ningún reactor de fusión que genere energía comercializable. Se ha dicho que la construcción de una central de esta índole representa una de las actividades científicas más arduas jamás emprendidas. Todos los países industrializados ejecutan investigaciones sobre fusión de importancia más o menos proporcional a su capacidad industrial y, además, un creciente número de países en desarrollo inician programas sobre fusión.

Uno de los resultados de toda esta actividad es la gran cantidad de reuniones que se celebra cada año en todo el mundo dedicadas a los diversos aspectos de las investigaciones sobre fusión. Las más importantes son las conferencias bienales del OIEA, la última de las cuales (la novena) tuvo lugar en septiembre de 1982**. (Véase un informe sobre la octava conferencia, celebrada en Bruselas en 1980, en el *Boletín del OIEA*, Vol. 22, Núm. 5/6, págs. 131-132.) Dado que asistieron a la conferencia de 1982 numerosos expertos en representación de todos los grandes laboratorios, los participantes pudieron celebrar, además de las sesiones previstas, varias reuniones de carácter informal sobre diversos temas.

En la tarde que precedió a la inauguración de la Conferencia, se celebró una sesión especial consagrada al proyecto de reactor internacional tokamak (INTOR). El proyecto Intor es un esfuerzo de colaboración entre las Comunidades Europeas, los Estados Unidos, el Japón y la URSS, tal como se explica en el artículo titulado "Centralización de las investigaciones sobre la fusión"

(*Boletín del OIEA, Suplemento de 1982*). Con él se pretende perfilar la próxima gran máquina experimental, más grande que las actualmente en construcción. En la presentación del Intor se mencionaron algunos de los temas principales del proyecto: física, control de impurezas, configuración mecánica, dispositivos magnéticos y consideraciones relativas al tritio.

Una de las facetas importantes de las comunicaciones consagradas a Intor era definir los sectores críticos del proyecto: sectores con respecto a los que se carece de información suficiente en que basar el diseño definitivo de varios componentes del Intor. Los participantes en la conferencia acogieron complacidos los progresos alcanzados con el proyecto Intor y formularon una serie de comentarios constructivos.

Los resultados presentados en la conferencia indican que se ha adelantado de modo considerable en el conocimiento del comportamiento del plasma y en el mejoramiento de los parámetros del confinamiento del plasma. Paralelamente, ha aumentado la confianza en que la próxima generación de grandes máquinas tokamak (JET de la CEE, TFTR de los Estados Unidos, JT-60 del Japón y T-15 de la URSS) logrará demostrar la viabilidad científica de la fusión.

Las sesiones técnicas han indicado que los principales países con programas de fusión están intensificando sus esfuerzos colectivos. En la conferencia se informó sobre nuevos e importantes resultados relativos a la investigación sobre la teoría del plasma y a la obtención de parámetros de plasma más elevados. Con el tokamak Doublet III (proyecto común del Japón y los Estados Unidos) se obtuvo un valor $\beta = 4,7\%$, sin precedentes ($\beta =$ relación entre la presión del plasma y la presión del campo magnético toroidal) mediante calentamiento por inyección de partículas neutras de 3,5 MW. Este resultado confirma las predicciones teóricas según las cuales el valor crítico de β para los plasmas alargados es mayor que para los plasmas circulares. Dado que el valor β que requiere un reactor de fusión es aproximadamente del 5%, las hipótesis básicas del diseño del Intor son realistas. Un creciente número de máquinas importantes funciona bien y con un bajo factor de seguridad $q = 2$; en el PDX (Estados Unidos) y en el Doublet III, el valor q para plasmas alargados es, respectivamente, de 1,6 y 1,4. Se han obtenido resultados alentadores en Alcator (Estados Unidos) empleando corriente producida por radiofrecuencia (RF). Se comprobó que la densidad de la corriente de radiofrecuencia (RF) en esta máquina era de $(4-6) \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, que es un orden de magnitud superior al de los resultados presentados en la última reunión sobre este tema, celebrada en marzo de 1982. Esto quiere decir que la producción de corriente no inductiva en los aparatos toroidales no solo es eficaz

* El Sr. Leiser es Jefe de la Sección de Física de la División de Investigaciones y Laboratorios del Organismo.

** Novena Conferencia internacional sobre investigaciones en materia de física del plasma y fusión nuclear controlada, celebrada en Baltimore (Maryland, Estados Unidos), del 1 al 8 de septiembre de 1982. La Conferencia fue organizada por el OIEA en colaboración con el Departamento de Energía de los Estados Unidos y con el Laboratorio de Física del Plasma de Princeton. Asistieron 588 científicos y unos 250 observadores no inscritos procedentes de 32 países y de cinco organizaciones internacionales.

cuando la densidad es baja sino también durante la fase de mantenimiento de la corriente. Ha mejorado considerablemente la eficacia de la producción de corriente por RF (de 0,8 a 1,2), pero no es todavía lo suficientemente alta para un reactor de régimen estacionario (que requiere un valor de ~ 8). Aumentando considerablemente el nivel de energía RF en los experimentos de calentamiento por resonancia ciclotrónica de los iones (CRCI) en PLT (Estados Unidos) fue posible aumentar la temperatura iónica T_i , que pasó de 0,4 keV, nivel señalado en la octava conferencia del OIEA en Bruselas, a 2 keV. En esta conferencia se hizo patente que una gran parte de los trabajos de investigación sobre tokamaks se dedica al calentamiento del plasma por radiofrecuencia y a la producción de corriente, ya que si ambas técnicas dan buenos resultados, se simplificarán en el futuro los requisitos para el diseño de reactores de fusión. Las modificaciones introducidas en la máquina ZT-40 de campo invertido (Estados Unidos) han contribuido a mejorar los parámetros del plasma. Gracias a la sustitución del revestimiento de alúmina por otro de Inconel de tipo fuelle y a la utilización de bobinas primarias del campo poloidal externo, la temperatura de los electrones T_e ha alcanzado 300 eV y se ha reducido la resistencia de la estricción por un factor de ~ 30 . También ha aumentado en un orden de magnitud el tiempo de acción de la corriente, llegando a 22 ms. En general, todos los experimentos de estricción en campo invertido (ECI) han demostrado que los principales parámetros del plasma, la densidad y la temperatura, aumentan con la corriente plasmática.

Los estudios teóricos han conseguido un nivel en el que la teoría puede explicar muchos de los fenómenos experimentales observados. Las memorias de índole teórica que se presentaron en la conferencia guardaban una estrecha relación con los experimentos. Las inestabilidades lineales de los plasmas toroidales siguen siendo objeto de estudios teóricos. En muchas presentaciones se examinaron las inestabilidades ideales y no ideales. Existe una discrepancia entre el bajo valor del 3% para β , pronosticado por la teoría y el del 4,7% obtenido en el Doublet III. En la conferencia se debatieron varias

ideas nuevas. Una de ellas indica que la polarización de los núcleos permite aumentar la tasa de reacciones DT por un factor de 1,5. No obstante, no se sabe qué método es más sencillo: polarizar los núcleos o mejorar los parámetros de confinamiento del plasma. Un problema de la teoría del plasma que requerirá atención en un futuro próximo es el de la conductividad térmica anómala de los electrones en los plasmas toroidales. Al igual que en otros casos, una teoría, para que sea válida, no debe limitarse a explicar los resultados experimentales sino que debe predecirlos también. En general, pese a nuestro conocimiento incierto del confinamiento del plasma, son alentadoras las perspectivas de construir un buen reactor.

En las investigaciones llevadas a cabo durante los dos últimos años sobre la fusión con confinamiento inercial (FCI), los experimentos se han centrado en la compresión ablativa. Se han acumulado suficientes datos experimentales para examinar las leyes de escala en el proceso de ablación. Al parecer, la utilización de láseres de longitud de onda más corta resolverá el problema del precalentamiento de los blancos. Como consecuencia de los importantes programas en el campo de la FCI, se espera que entre 1983 y 1986 se realicen experimentos que demuestren la viabilidad científica del concepto, es decir, $Q = 1$ (Q es relación entre la energía de fusión liberada y la energía consumida). A fin de demostrar las posibilidades del método FCI, conviene resolver en un futuro próximo cuestiones como la de la eficacia hidrodinámica, el precalentamiento, el aumento de la compresión y la simetría de la irradiación de la pastilla.

Los problemas planteados por el diseño de reactores fueron ampliamente recapitulados en la sesión especial sobre el Intor; solo se presentaron en la conferencia documentos con ideas nuevas y diferentes. Actualmente, es posible afirmar que se ha desarrollado toda una serie de modelos bien definidos sobre reactores tokamak, cuya construcción podría iniciarse. Se han fomentado otros modelos que presentan valores β más elevados para pasar a la etapa del diseño conceptual de reactores, que en varios aspectos son superiores al grupo de referencia de los tokamaks.