

UNA ENERGÍA PARA EL SIGLO XXI: LA FUSIÓN POR CONFINAMIENTO INERCIAL

En enero de este año (1995) el Organismo Internacional de Energía Atómica ha publicado su primera monografía extensa dedicada al tema de Fusión por Confinamiento Inercial. El libro lleva por título: "Energy from Inertial Fusion", y es un acontecimiento reseñable.

Tan sonoro título está justificado en el preámbulo del Director General del Organismo, Hans Blix, por el enorme avance realizado en estas investigaciones, que permiten considerar científicamente la Fusión por Confinamiento Inercial como una de las posibles fuentes de energía que en el futuro podrían implantarse para satisfacer las necesidades de la humanidad.

Recuerda el Director General en su preámbulo que, en 1970, el informe del Panel de especialistas sobre Fusión, asesores del OIEA, no contuvo ninguna información relativa al confinamiento inercial. No obstante, los subsiguientes paneles de 1978 y 1990, sí contuvieron datos y apreciaciones sobre el tema, si bien estos informes, al igual que la mayor parte del trabajo desarrollado por el OIEA en este campo, se dirigían a la Fusión por Confinamiento Magnético.

Las razones de esta diferencia de trato a una y otra aproximación son de tipo histórico y de político, lo cual podría resumirse en una sola frase: clasificación de conocimientos y tecnologías.

La política de clasificación ha sido muy específica de la energía nuclear en di-

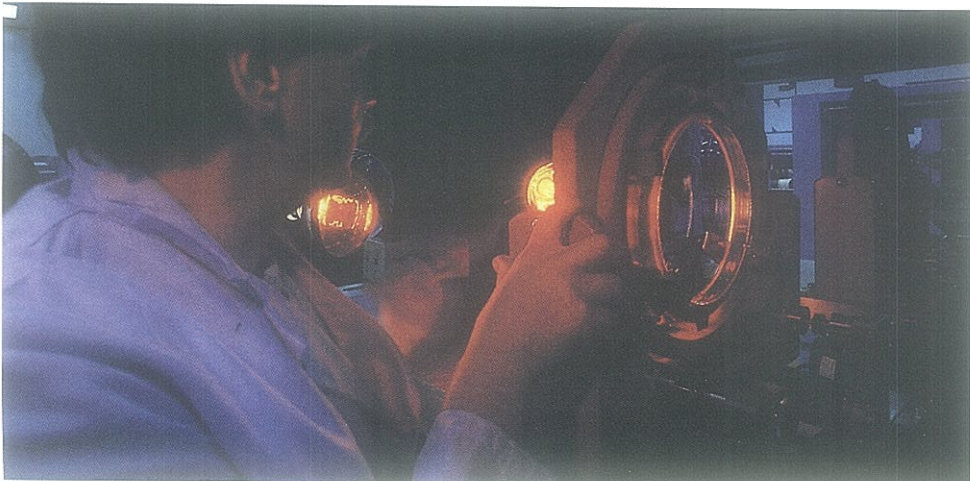
versos campos, y la propia energía nuclear de fisión, hoy comercializada, estuvo sometida a fuerte clasificación durante el período de la guerra fría, particularmente en su momento más álgido (es decir, más frío).

En estos momentos la clasificación relativa a la fusión por confinamiento inercial es aún muy importante en todos los países avanzados que forman parte del club de potencias nucleares, entendiéndose EEUU, Rusia, Francia y Reino Unido. Un caso absolutamente distinto es el de Japón o Alemania, si bien este último país no tiene un programa específico de confinamiento inercial, aunque varios de sus laboratorios y universidades se dediquen a aspectos parciales de este tema. Por lo que corresponde a Japón, su programa nacional de confinamiento inercial todavía no está claramente orientado a los aspectos tecnológicos de producción de energía, pues como todo lo relativo a la fusión, sus investigaciones se encuentran en un nivel que podríamos denominar de investigación avanzada. El adjetivo avanzada cobra especial significación, pues no se trata simplemente de que se verifiquen avances en un tema específico, sino que dichos avances se sitúan en la frontera de conocimientos y en lo más adelantado para estimular el desarrollo de otras tecnologías, como es el caso de los láseres de alta potencia y su tecnología optoelectrónica y de materiales, que con seguridad proporcionará importantes

G. VELARDE, J. M. MARTINEZ-VAL,
J.J. HONRUBIA, E.MINGUEZ, J.M.
PERLADO, M.PIERA, J.SANZ,
P.VELARDE.

Los autores son miembros del Instituto de Fusión Nuclear, E.T.S. Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid. Desde su fundación en 1980, este Instituto ha tenido como objetivo fundamental de trabajo la Fusión por Confinamiento Inercial. Sus publicaciones internacionales superan el centenar y sus intervenciones en congresos y conferencias son así mismo cuantiosas. Una parte importante de sus desarrollos han estado auspiciados por el PIE (Plan de Investigación Electrónica) y por la Unión Europea (Programas Experimentales en el Laser PHEBUS-Limeil, Francia). Durante el 19th ECLIM organizado por el Instituto en Madrid, en 1988, se constituyó la Internacional Society for Inertial Fusion, cuyo presidente fundador es el Director del Instituto, Guillermo Velarde.

Los cristales de conversión de frecuencia convierten los rayos laser de luz infrarroja a ultravioleta, que es más eficiente para la producción de reacciones de fusión.



beneficios a la ingeniería en otras áreas. La evolución de la investigación científica abierta en Fusión por Confinamiento Inercial y el paulatino cambio en las políticas de clasificación, ha permitido al Organismo Internacional de Energía Atómica, que siempre ha de moverse en el exquisito tacto diplomático que caracteriza a una organización dependiente de la ONU, a abordar con rigor esta aproximación a la fusión, y a prestarle una atención rápidamente creciente. El libro que citamos ha sido editado por el Doctor W.J.Hogan, presidente del IAEA Advisory Group on Inertial Fusion Energy, científico procedente del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore. En dicho grupo asesor figuran también el Dr. J.Coutant, director de la División de Láseres del Laboratorio Limeil-Valenton del CEA (Francia), el

el prefacio de este libro muestran su optimismo hacia lo que la fusión por confinamiento inercial puede hacer por la humanidad en el futuro. Su última frase es particularmente representativa de su opinión: "Los líderes del mundo, con visión y no condicionados por hipótesis obsoletas, pueden proporcionar a la humanidad la mejor de las opciones energéticas para las futuras generaciones". Este libro, que nos está sirviendo de introducción al tema y de planteamiento marco de la situación actual del confinamiento inercial, contiene nueve capítulos que cubren desde los aspectos más básicos de la hidrodinámica hasta las actividades internacionales y de cooperación que empiezan a desarrollarse ahora, pasando por las cuestiones más complejas tecnológicamente hablando, como son los láseres y las mi-

tentes sobre desarrollos nucleares similares en otros ámbitos de la energía nuclear, tan solo se podrá conseguir el éxito completo en estas iniciativas si se apoya suficientemente con programas de investigación y desarrollo financiados, coordinados, soportados y estimulados por decisión gubernamental, con la colaboración internacional adecuada. Con ello se podrá traducir en realidad lo que son ideas científicas y experimentos de alcance limitado, convirtiéndolos en una fuente de energía económicamente explotable.

Un desafío científico integral

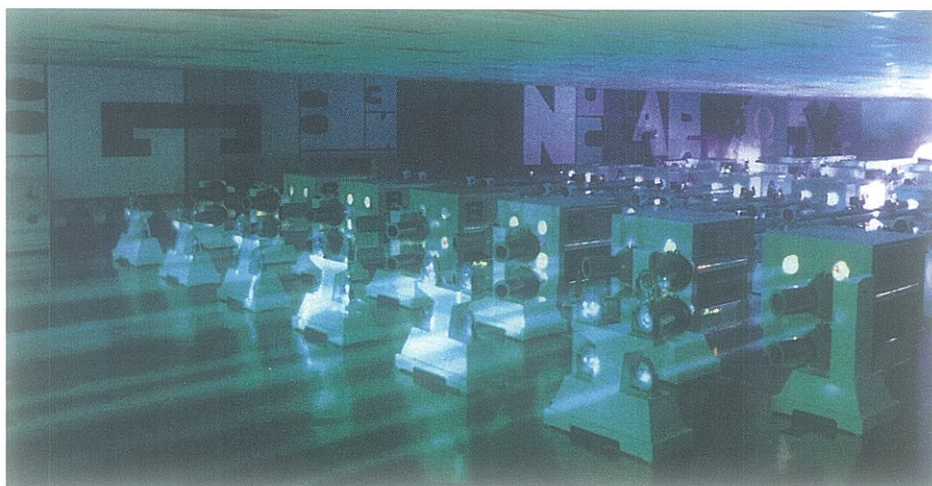
En 1939, el prestigioso científico y posteriormente Premio Nobel Hans Bethe publicó un artículo en *Physical Review* (nº 55) en el que demostraba que la energía desprendida en las reacciones de fusión del hidrógeno eran la auténtica gasolina del universo, y de modo particular constituían el motor de la evolución estelar. De ello se deducía que la fusión es la fuente energética primordial, y por tanto el sustento de la vida en nuestro planeta, dependiente de la radiación solar a estos efectos.

El tipo de reacciones de fusión descubiertas por Bethe (y otros ilustres antecesores como Eddington, Gamow y Peierls) podían calificarse de fusión por confinamiento gravitatorio, habida cuenta de que la atracción gravitatoria era la causa de que se obtuvieran en los cuerpos estelares las temperaturas y densidades necesarias para producir una reacción de fusión de tan alta potencia.

Una cuestión fundamental a señalar, sobre todo para diferenciar a los reactores de fusión del modelo más familiar de los reactores de fisión, es que en los primeros no existe lo que se denomina una reacción en cadena automantenida. No hace falta una partícula, como es el neutrón en el caso de la fisión, que induzca las reacciones y se multiplique gracias a ellas. En el caso de la fusión, las reacciones se producen directamente entre los núcleos existentes como consecuencia de la energía cinética que llevan, que les permite superar la barrera coulombiana de repulsión. Por otro lado, es imprescindible una densidad para que el número de reacciones por unidad de volumen y tiempo sea suficientemente. El método de confinamiento, sea gravitatorio como el de las estrellas o sea de otro tipo, tiene como misión alcanzar y mantener las condiciones de la materia en las cuales la tasa de reacciones de fusión deviene significativa, o incluso muy alta.

La teoría de las reacciones de fusión explicada por Bethe, Gamow, Teller, y otros permitió identificar claramente que ésta se podría conseguir mediante métodos termonucleares, en los cuales se mantuviera una temperatura del orden de decenas de millones de grados. Un procedimiento para mantener el confinamiento consistía en la aplicación de fuertes campos magnéticos exteriores

El sistema laser OMEGA en operación, con todos los 24 rayos disparando.



Prof. S.Nakai, director del Instituto de Ingeniería del Laser de la Universidad de Osaka (Japón), el Dr.Rozanov, jefe de la Sección de Láseres del Instituto de Física P.N.Lebedev (Rusia) y el Prof. G.Velarde, director del Instituto de Fusión Nuclear de la UPM.

En el prefacio del libro, cuatro científicos que podrían considerarse absolutamente pioneros en las investigaciones de Fusión por Confinamiento Inercial recuerdan como desde el principio de los 60, poco después de haberse inventado el láser, se consideró el uso de láseres de alta potencia podía proporcionar fuertes compresiones y calentamientos de la materia que llevaran a ésta a condiciones de fusión. Estos cuatro pioneros son el académico N.G.Basov (Premio Nobel de Física), el Dr. R.Dautray, miembro de la Academia de Ciencias de Francia y Haut Commissaire del CEA, el Dr.J.H.Nuckols, ex-director del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, y C.Yamanaka, director y fundador del Instituto de Ingeniería de Láseres de la Universidad de Osaka. En

crocápsulas de fusión, sin olvidar otros aspectos tal cual la seguridad, el impacto ambiental, y la economía. Sus autores proceden de diversos países, particularmente EEUU, Rusia, Japón, Francia, Alemania y España.

Ahora bien, el hecho de que científicamente haya motivo para ser optimista sobre esta fuente de energía no debe conducirnos a una miopía que vea minimizada la dificultad del desarrollo tecnológico que queda por delante. Los cuatro pioneros a los que antes aludía, escriben en su prefacio una frase que resulta extraordinariamente indicativa de lo que se necesita en un futuro:

"La magnitud y duración del programa de desarrollo para cualquier iniciativa mayor de ciencia y tecnología, tal como la demostración de la factibilidad científica de la fusión inercial, o cualquier programa de demostración de obtención de fusión por confinamiento inercial a gran escala, son tan extensas como para requerir que tales acciones se deban desarrollar bajo el auspicio de agencias gubernamentales".

En efecto, y según los precedentes exis-

con la configuración precisa para permitir que los iones chocaran entre sí gracias a la energía cinética media correspondiente a las temperaturas alcanzadas.

Otra alternativa más cercana, por así decirlo, a la fenomenología de las estrellas, aunque de duración temporal y tamaño volumétrico enormemente más pequeño, es el confinamiento inercial, consistente en aprovechar la acción de fuerzas mecánicas de compresión de pequeñas cantidades de material fusible, para alcanzar las condiciones de fusión, aunque sea durante un tiempo muy breve.

En un famoso artículo de 1957 en los Proceedings de la Physical Society, el científico británico J.D. Lawson demostró que, para conseguir rentabilizar un método de confinamiento de fusión nuclear, en el sentido de obtener de él más energía de la necesaria para calentarlo y confinarlo, el resultado de multiplicar la densidad iónica por la duración del confinamiento debía exceder una determinada cantidad o umbral. Concretamente para la reacción de fusión más asequible, la de deuterio-tritio, este valor es de $10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$, valor que especifica claramente qué condiciones se han de obtener en la materia. En el caso del confinamiento magnético, se utilizan plasmas enrarecidos, con densidades iónicas del orden de 10^4 iones/cm³, o incluso menos, confinados durante tiempos de un segundo o más largos.

Por otro lado, el confinamiento inercial no permite tiempos de confinamiento tan elevados, pues dichos tiempos de un segundo son enormes comparados con los tiempos propios de las reacciones nucleares. La compresión de la materia y su posterior explosión mecánica como consecuencia de la alta presión existente en su seno, está regida (en primera aproximación) por la velocidad del sonido en el medio. En un plasma de hidrógeno, la velocidad del sonido es aproximadamente $3,5 \times 10^7 \text{ T}^{1/2}$ (en centímetros/segundo), siendo T su temperatura medida en kiloelectrónvoltios. (Un kiloelectrónvoltio es aproximadamente a 11 millones de grados). La magnitud antecitada nos indica que la compresión de pequeñas cantidades de material, comprimidas a volúmenes de unas 100 micras o algo más, puede extenderse durante períodos del orden del nanosegundo como máximo. Más aun, cuando la temperatura aumente mucho, la explosión mecánica se hará incluso más rápida.

Ello quiere decir que en confinamiento inercial hace falta conseguir densidades superiores a 10^{23} iones/cm³, lo cual se ha de comparar con la densidad iónica del deuterio-tritio criogénico, que podría usarse como combustible de este método de confinamiento. El citado material tiene una densidad de $0,2 \text{ g/cm}^3$, y una densidad iónica (por cada especie) de $0,24 \times 10^{23}$ iones/cm³. A primera vista parecería que no hace falta comprimir mucho la materia (unas diez veces más

o menos) para satisfacer el criterio de Lawson, pero lo cierto es que no solo hay que llegar hasta dicho criterio sino proporcionar un quemado suficientemente alto del material fusible para que la ganancia energética sea importante. Veremos en párrafos sucesivos que las fases iniciales para producir el confinamiento inercial consumen una gran cantidad de energía, con rendimientos muy inferiores a la unidad. Para compensar esto, en la microcápsula de fusión se ha de obtener una ganancia energética próxima a cien, entendiendo por esto que la energía de la fusión sea cien veces mayor que la energía de los haces confinantes que han servido para calentar y comprimir la microcápsula.

Esto hace que la fusión por confinamiento inercial pueda considerarse como un *desafío científico integral*, fuertemente multidisciplinar, y por tanto muy estimulante para la creatividad humana. Por supuesto, la fusión por confinamiento inercial se beneficiará de avances especializados en múltiples tecnologías, desde el bombeo de los materiales ópticos activos del láser, hasta la supercomputación; pero será fundamentalmente la integración de todos esos avances lo que permitirá dar una respuesta positiva al desafío que en sí comporta este método de explotación de la fusión.

Aun cuando manifieste un carácter integral en sus aspectos científicos, la fusión por confinamiento inercial manifiesta también la posibilidad de *separar tecnológicamente las diversas fases del proceso*, y sus equipos involucrados, de tal forma que simplifiquen considerablemente la concepción tecnológica de un posible **reactor de fusión**. Hasta la fecha se ha elaborado una docena larga de diseños conceptuales de reactores de fusión por confinamiento inercial, y en todos ellos se ha puesto énfasis en la importancia y las ventajas que se desprenden de poder separar en módulos suficientemente alejados, aunque conectados entre sí, la fase de generación de los haces confinantes, la interacción de éstos con la microcápsula y la microexplosión de ésta, y su conversión en energía térmica para alimentar un ciclo termodinámico.

En particular es importante la posibilidad de separar los dos primeros equipos o sistemas, pues el generador de los haces confinantes, tanto si se trata de un láser como si es un acelerador de partículas, es un conjunto de componentes delicados, que ha de estar en atmósfera muy controlada, alejados de vibraciones contraproducentes, y que requiere un control y sintonización muy finos. De ahí la característica muy importante de que estos sistemas puedan quedar total-

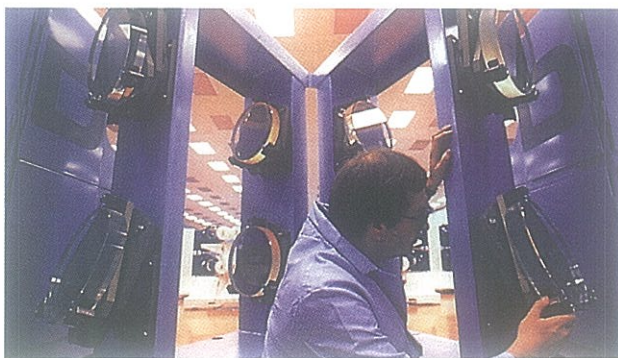
mente aislados de lo que ocurre en la cámara de reacción.

Esta separación entre fases y equipos permite también una explicación sistemática de qué es lo que ocurre en un reactor de fusión por confinamiento inercial. Las figuras adjuntas contribuyen a un mejor entendimiento de esta explicación.

Física de la microcápsula

El fenómeno central de la microcápsula son las reacciones de fusión nuclear que ocurren en su interior cuando se alcanzan condiciones de fusión. Estas condiciones dependen del tipo de reacción que se quiera explotar. La más asequible es la de deuterio-tritio, cuya temperatura de ignición en el caso más desfavorable es de 4,5 kiloelectrónvoltios. Este caso más desfavorable está representado por la hipótesis de escape total de toda la radiación de frenado de los electrones que acompañan a los io-

El último punto en el compartimento laser antes de enviar los rayos a la cámara anticátodo.



nes. En el confinamiento inercial, al ser el plasma comprimido un cuerpo relativamente opaco a los fotones de frenado, parte de éstos se reabsorben en el seno de la propia microcápsula y como consecuencia la temperatura de ignición puede ser algo menor, aunque siempre por encima de un kiloelectrónvoltio, pues por debajo de esta temperatura la reactividad de la reacción es muy baja.

La reacción de fusión de deuterio-tritio produce como resultado la aparición de un núcleo de helio con 3,5 MeV de energía cinética y un neutrón de 14,1 MeV. Al contrario que en los plasmas rareificados, como son los de confinamiento magnético, en los plasmas de confinamiento inercial, con un espesor óptico del orden de 4 g/cm^2 , los neutrones no escapan sin colisionar, y en cada colisión ceden unos 3 MeV de energía al ión del deuterio o tritio con quien colisionan elásticamente. Por su parte, las partículas alfa depositan toda su energía cinética en la propia microcápsula fusible, todo lo cual incrementa rápidamente la temperatura iónica del plasma, que llega a alcanzar más de 250 kiloelectrónvoltios de temperatura cuando la fusión está totalmente propagada.

Esta temperatura es incluso excesiva, en el sentido de que está por encima del máximo que presenta la reactividad de esta reacción alrededor de unos 100 kiloelectrónvoltios, pero es la consecuencia de la fortísima liberación energética en la reacción de fusión, pues el tres por mil de la masa de los reactivos desaparece.

Como consecuencia de la altísima temperatura del plasma fusionable, éste se expande rapidísimamente, a velocidades superiores a 10^8 cm/s, por lo que una vez en marcha la microexplosión de fusión en un plasma de contenido másico total de 1 ó 2 mg de deuterio tritio, el confinamiento apenas dura 50 picosegundos (50×10^{-12} s).

A pesar del cortísimo tiempo que dura el confinamiento en el caso de que se consiga propagar la ignición de fusión, éste es más que suficiente para conseguir que casi la mitad de los iones de deuterio y tritio se fusionen, liberando la energía antecitada. Por cada mg de deuterio-tritio que se fusione totalmente, aparecerán en forma de energía cinética de las partículas producto 335 megajulios. Esta es una referencia fundamental para calcular la ganancia energética de una microexplosión, que se define como la energía obtenida en ésta, dividida por la energía de los haces confinantes que la producen.

En la figura 1 se presenta un esquema de reactor nuclear de FCI, en la que se manifiestan las principales etapas energéticas, y se establece una condición de funcionamiento, de tal manera que se recicle dentro de la planta una cantidad de electricidad que sea lógicamente menor del 100%. Para que ello sea posible se ha de dar la condición

$$\eta GME > 1$$

donde las letras en cuestión corresponden a los rendimientos y multiplicaciones de los procesos descritos.

Como todo campo de investigación, la fusión por confinamiento inercial está sujeta aun a muchas incertidumbres en los datos y coeficientes que caracterizan su fenomenología, pero hay que advertir sin embargo que estas incertidumbres son prácticamente inexistentes por lo que a la parte nuclear se refieren.

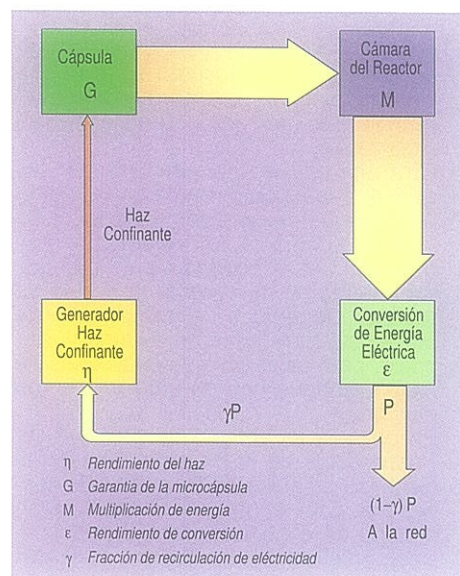
De hecho, las incertidumbres que aun condicionan nuestro conocimiento de la fusión por confinamiento inercial son de tipo tecnológico más que de tipo científico y están relacionadas con las tolerancias de fabricación de microcápsulas y con la generación y transmisión de haces confinantes, entre otros aspectos. En efecto, el problema fundamental para conseguir condiciones de fusión en un plasma de deuterio tritio comprimido hasta alta densidad y calentado a decenas de millones de grados, lo plantea el requisito de producir una compresión perfectamente esférica del deuterio-tritio. De no ser muy uniforme y prácticamente esférica dicha compresión, la masa comprimida tenderá a salir por las direcciones donde la presión sea mínima, y el confinamiento alcanzado será

de muy baja calidad, poniendo incluso en dificultades la obtención de la temperatura de ignición. Para obtener una compresión perfectamente esférica se han de dar tres requisitos:

- Obtener una deposición de energía de los haces confinantes sobre la parte exterior de la cápsula que sea prácticamente uniforme, esféricamente hablando.
- Fabricar microcápsulas que presenten una esféricidad prácticamente perfecta en las capas que la conformen, que típicamente serán dos (la interior, donde estará el material fusionable, y la exterior, donde se encuentra el material sobre el que interaccionan los haces confinantes). En la figura 11 se muestran esquemas de algunas microcápsulas.
- Que no se produzcan inestabilidades hidrodinámicas ni durante la implosión de la cápsula ni durante la fase de cierre de su hueco central, pues dichas inestabilidades hidrodinámicas destruirían el confinamiento, produciendo el escape del material a confinar a lo largo de las direcciones de mínima presión, o mezclando el material fusionable con el material de las capas externas, que suele ser un material más pesado, no fusionable en absoluto, y que impediría que se desarrollaran las reacciones de fusión.

Puede decirse que en los tres requisitos anteriores se cifra la auténtica dificultad de obtener la Fusión por Confinamiento Inercial, y que los desarrollos científicos y tecnológicos que se están realizando conducen a la eliminación de estos problemas, no solo mediante la reducción de las tolerancias de fabricación, sino por la adopción de esquemas de interacción y de compresión que sean menos sensibles, o no sensibles en absoluto, a los problemas de inestabilidades hidrodinámicas y de falta de simetría en la interacción de los haces confinantes con la microcápsula.

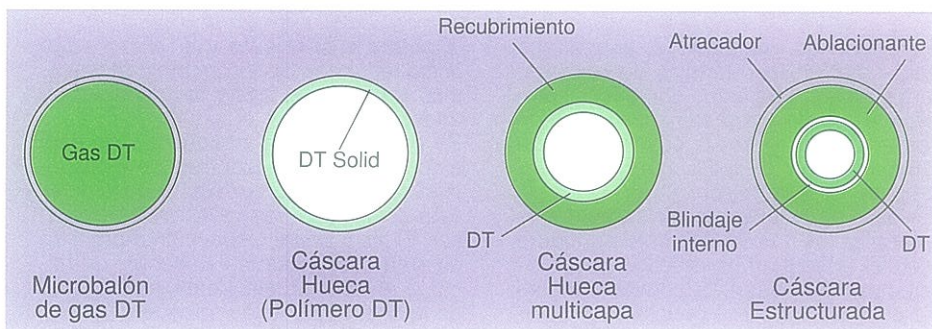
Para llegar a las condiciones de fusión, la microcápsula ha de experimentar en las etapas anteriores (que duran algunos nanosegundos) una evolución termohidrodinámica que sea adecuada. En la figura 11 se aprecia el corte esquemático de una microcápsula de fusión, en la que puede verse un hueco central contra el cual va a implosionar la capa de material fusionable, como consecuencia de la reacción hidrodinámica a la interacción de los haces confinantes. Esa fase de implosión es extraordinariamente importante por la compresión esférica que hay que conseguir en el deuterio tritio. En la implosión se trata de acelerar el deuterio tritio hasta velocidades del orden de 4×10^7 cm/s, a lo que corresponde una energía cinética del orden de 80 megajulios/gramo. Cuando el deuterio tritio que implosiona hacia el centro de la cavidad llegue a cerrar ésta, dicha energía cinética se transformará en energía térmica (y en energía de compresión, aunque la compresión es energéticamente más barata que el calentamiento, por así decirlo). Gracias a esta conversión de energía cinética en tem-



FI - Esquema de las conversiones energéticas que tienen lugar en los diversos componentes de una central de Fusión por Confinamiento Inercial. Para que fuera rentable, la fracción de energía recirculada, γ , debería ser mucho menor que la unidad. Los valores de G y M deberían ser mayores que uno (por ejemplo, $G=100$; $M=1,3$) mientras que ϵ sería del orden de 0,4 y η , el rendimiento energético del driver (generador de los haces confinantes) es la mayor incertidumbre tecnológica de la FCI.

peratura, y al confinamiento inercial y de atraque que proporcionan las capas exteriores de material fusionable y de material exterior que aun permanezca rodeando aquélla, se podrán conseguir condiciones de fusión, llegando a temperaturas centrales de varios kiloelectrónvoltios y de compresiones medias de varios cientos de gramos por centímetro cúbico. Hasta la fecha, no han podido conseguirse ambas magnitudes, temperatura y densidad, en un mismo experimento, pues no hay energía suficiente en ningún laboratorio del mundo para producir ambas cosas al mismo tiempo. En algunos experimentos con poquísima masa (del orden o menor a los microgramos de deuterio-tritio, en forma de gas) se han podido obtener muy altas temperaturas, pero prácticamente sin densidad y con un espesor óptico tan pequeño que incluso las partículas alfa escapaban del plasma. Con experimentos de este tipo se han podido conseguir microexplosiones en las que se han producido más de 10^{13} neutrones, lo que representa una liberación energética algo menor de 30 julios. Dichos experimentos han sido realizados con láseres del orden de 15 kilojulios (como el Gekko XII de la Universidad de Osaka) por lo que la ganancia energética de la microexplosión ha sido muy inferior a la unidad, del orden de 0,002.

Con este mismo láser, pero orientando la microexplosión a la producción de material fuertemente comprimido, se ha logrado densificar deuterio criogénico hasta 600 veces su densidad inicial, llegando a densidades del orden de 100 gramos/cm³. Para ello se han utilizado técnicas de multiplexión temporal del



F II - Cortes esquemáticos de microcápsulas de FCI. Las dos primeras son básicamente usadas en investigación. Las dos de la derecha podrían ser las cápsulas para reactores comercializados.

pulso láser de tal forma que la compresión resultara isentrópica, y el tren de ondas de choque que sucesivamente van creándose convergentemente hacia el centro de la micropastilla, prácticamente se superpongan justo antes de su llegada al centro.

Combinando ambas técnicas, utilizando láseres de mucha mayor potencia y cápsulas del orden de un microgramo de deuterio tritio, podría pensarse en diseñar un experimento de ignición, en el que se obtuviera más energía de fusión que la energía de los haces confinantes. En un epígrafe posterior, dedicado a los programas de I+D, se mencionará la proyección que en el programa francés de confinamiento inercial se realiza sobre éste tema, y que concuerda considerablemente bien con las estimaciones teóricas refrendadas por los experimentos antedichos.

Continuando nuestra marcha de dentro a afuera en la física de la cápsula, nos encontramos con que para producir la implosión esférica convergente del deuterio tritio hace falta que la interacción de los haces confinantes con la parte exterior de la microcápsula no solamente sea uniforme, sino adecuada a lo largo del tiempo. Ante todo hay que aclarar que esta interacción depende fuertemente del tipo de haz confinante que se utilice, y a este respecto hay que distinguir tres posibilidades:

- La utilización de haces de luz **láser**, y por tanto fotones, que interactúan con la materia muy superficialmente (esto es, sin penetrar excesivamente en ella). En la interacción del láser de alta potencia con la materia, se crea un plasma de baja densidad que forma una corona externa a la microcápsula, que se ablaiona con velocidades y temperaturas muy elevadas. La temperatura de los electrones de la corona puede llegar a alcanzar 10 kiloelectrónvoltios. Debido al fuerte gradiente térmico que se origina entre la corona y la superficie aun sólida del interior de la microcápsula, se establece una transmisión por conducción electrónica de parte de la energía depositada por el láser hacia el interior, lo cual continúa produciendo la ablación de material sólido de la superficie de la microcápsula.

En esta ablación, el material exterior que sale proyectado hacia afuera hace las veces de los gases de escape de un

motor cohete. Como reacción, la parte interna de la microcápsula es acelerada hacia el interior (por conservación del impulso o cantidad de movimiento). En teoría, el máximo rendimiento hidrodinámico de un cohete es aproximadamente 2/3, entendiéndose por esto que dos de cada tres unidades de energía se comunican al cohete (y 1/3 a los gases impulsores). En los cohetes reales, contando el calentamiento de los gases, y no meramente su energía cinética direccional, este rendimiento se hace menor del 50%. En una aceleración con láser, el rendimiento es aún menor, por debajo del 10%. Ello se debe a las fuertes pérdidas energéticas en el plasma de la corona, pero aún así la idea puede funcionar bien energéticamente hablando, si se logra producir la ignición de las reacciones de fusión.

- Alternativamente al láser, pueden usarse **iones** como agentes de confinamiento directo, aunque éstos presentan serios problemas de enfoque uniforme sobre la microcápsula. Los iones penetran en ésta más que los fotones, pues en éstos la interacción electromagnética con el plasma circundante es muy intensa (llegando a un punto donde el índice de refracción se hace infinito y los fotones son mayoritariamente absorbidos en una longitud de onda). Los iones necesitan más material exterior de la microcápsula para su frenado, lo cual tiene efectos en general beneficiosos. En particular, no se produce un plasma tan caliente (puede limitarse a 100 eV o menos) y el rendimiento hidrodinámico de la implosión puede pasar del 10%. La mayor desventaja de los haces de iones es la dificultad de obtener con ellos una deposición de energía esféricamente uniforme. Algunos autores señalan que ésta dificultad es insuperable (aunque no ha habido evidencia experimental suficiente en contra) y de ahí que se apueste por una tercera vía, llamada "indirect drive", que se comenta a continuación.

- En la vía indirecta, la ablación es provocada por un flujo isótropo de **radiación térmica**. Este flujo podrá ser generado tanto por los haces láser de la primera alternativa como por los haces iónicos de la segunda, aprovechando precisamente la interacción de estos haces con unos cuerpos de geometría y material apropiados (alto Z). La idea es

relativamente simple, y se asemeja a un horno de microondas, sólo que en este caso no se trata de ondas en el rango de GHz (con energías por fotón-onda mucho menores que 1 eV) sino fotones-onda provenientes de la emisión electromagnética (radiación) de un cuerpo negro a unos 300 eV. El flujo de radiación quedaría confinado mayoritariamente dentro de ese horno, y los fotones-onda se reflejarían en sus paredes (con poca pérdida energética). En el centro del horno, de manera similar a como ocurre en un microondas, se colocaría la microcápsula fusionable, con una capa exterior que se evaporaría intensa y súbitamente (ablación) provocando la aceleración de la capa interna (de deuterio tritio) por efecto cohete.

La gran ventaja de este tercer método es que, en teoría, el flujo térmico puede configurarse con un altísimo grado de isotropía, y por ende la ablación de la microcápsula será perfectamente esférica, si la cápsula lo es. En la práctica, para obtener un flujo isótropo hace falta sacrificar el rendimiento energético pues, por así decirlo, hay que permitir que los fotones que distorsionan la isotropía vayan desapareciendo o se isotropan. El resultado es que se introduce una etapa más de conversión energética de bajo rendimiento, pues el haz láser o el haz iónico no inciden directamente sobre la cápsula, sino en un re-radiador que convierte su energía en radiación isotropizada. Para obtener una implosión de calidad se paga un precio en la cantidad, y el balance energético puede quedar deficitario.

Ahora bien: se han señalado los problemas inherentes y las dificultades intrínsecas de este método de confinamiento porque el rigor académico así lo exige; pero no debe olvidarse un punto esencial, ya citado en líneas precedentes: la fusión nuclear lleva asociada una importante conversión de masa en energía; y si se logra detonar la microexplosión de suficiente masa (en miligramos) de deuterio-tritio, se podrá alimentar un ciclo termodinámico y producir energía.

La cámara de reacción y el sistema energético

El resultado de una microexplosión puede caracterizarse por los siguientes datos: inicialmente los neutrones llevarán el 80% de la energía; cederán parte de ella al medio (entre la cuarta y la quinta parte) y emergerán de la micropastilla, a velocidad mayor que los iones. Entre éstos, tendremos los núcleos de deuterio y tritio que no se hayan fusionado, y les acompañarán las partículas alfa que se han producido en las fusiones y que habrán compartido su energía con los anteriores. Además de estos productos, neutrones e iones, existirán fotones de energía bastante elevada (rayos X muy duros, de decenas de keV) que llevarán un pequeño porcentaje de la energía total liberada en la fusión ($\geq 1\%$) y que serán los primeros entes

en interaccionar con la pared interna de la cámara de reacción.

Esta primera pared es crítica en el comportamiento del reactor, como lo es en todos los reactores de fusión termonuclear de cualquier método de confinamiento.

Para asegurar su integridad durante un plazo suficientemente largo, es imprescindible protegerla, pues la acción directa de los rayos X y de los iones deterioraría su superficie y su espesor rápidamente. El efecto de los neutrones es más volumétrico, por su enorme poder de penetración, y las secuelas de la irradiación y la activación neutrónicas hay que valorarlas tanto en dicha pared como en el resto de estructuras, y tanto por motivos de integridad y rigidez del sistema como por cuestiones radiológicas.

En las figuras adjuntas se presentan varios diseños conceptuales de reactores de FCI. La solución más propuesta para proteger la primera pared es la creación de una cortina de litio que se evaporará como consecuencia de cada microexplosión y se reconstituirá mediante los adecuados métodos hidrodinámicos (permeacción, inyecciones rotativas, etc...).

El uso del litio como material protector de la primera pared no es caprichoso, sino que obedece a la necesidad de producir tritio, isótopo radiactivo que se encuentra muy escasamente en la naturaleza, pues solo se produce como interacción de la radiación cósmica con el nitrógeno en las capas más elevadas de la atmósfera. El tritio producido en las centrales nucleares de fisión sería prácticamente irrelevante a efectos prácticos para alimentar reactores de fusión. Para que estos reactores sean autosuficientes en toda su extensión, incluida la materia prima, hace falta producir el tritio in situ. Los dos isótopos naturales del litio (el 6 y 7) experimentan reacciones neutrónicas en las que se produce tritio, siendo ésta la vía más adecuada para la obtención de este material.

Así pues, además de la existencia de litio fundido como protector de la primera pared de la cámara de reacción, prácticamente en todos los diseños conceptuales se encuentra este elemento en diversas mezclas, aleaciones o eutécticos, con objeto de conseguir la reproducción de tritio necesaria para el autoabastecimiento del reactor de fusión. Algunos diseños optan por el eutéctico de litio y plomo, y en otros casos se emplea litio en forma sólida, en compuestos de tipo cerámico, que a su vez ha de ser refrigerado por un gas, como puede ser helio. La opción de emplear litio fundido, bien puro o en el eutéctico mencionado, aporta la ventaja de que se puede utilizar además como material refrigerante.

No podemos olvidar que el fin último de la explotación de la fusión es producir energía, y por tanto alrededor de la cámara de reacción y como parte integrante de su sistema externo, habremos de

encontrar los mecanismos necesarios para crear un foco térmico de temperatura superior, que actúe como foco calorífico en un ciclo termodinámico, bien directamente, bien a través de un intercambiador de calor, que puede ser un generador de vapor.

En esta parte externa de las centrales futuras de fusión por confinamiento inercial encontramos prácticamente los mismos componentes convencionales de cualquier planta productora de energía eléctrica, con la peculiaridad anticipada de la presencia de litio.

Las opciones para convertir la energía mecánica en energía eléctrica son también absolutamente convencionales, basadas en turboalternadores como los actualmente utilizados en las centrales nucleares, o diseños futuros de este tipo de máquinas.

Entre los diseños conceptuales sobre reactores FCI existen algunos que aportan datos económicos con una proyección sobre la actualidad de lo que podría ser la tecnología del futuro. Es comprensible que en estos estudios se encuentre como conclusión que la energía nuclear FCI puede ser una competidora eficiente y económica ante cualquier otro modo de producción de energía eléctrica, y se achacará este optimismo al hecho de que quien promociona dichos estudios es un ferviente defensor de esta fuente de energía. Sin embargo, el rigor de algunos de estos estudios es intrínsecamente alto, y la única hipótesis que habría que cumplir para que dichos estudios fueran verosímiles es que realmente se pudiera producir la ignición de micropastillas de unos pocos miligramos de deuterio-tritio con haces confinantes de energía total por pulso de algunos megajulios. En un apartado subsiguiente, en el que consideraremos algunos programas de futuro en este campo, se verá que las proyecciones y extrapolaciones realizadas por expertos considerablemente cualificados en política científica vaticinan que ello podría ocurrir, aun cuando existan dificultades inherentes como las mencionadas en el apartado dedicado a la física de la microcápsula.

Generadores de haces confinantes

Al hablar de la implosión de la microcápsula se hacía mención de los haces confinantes que tienen por misión producir en el exterior de la microcápsula una microevaporación súbita de una cantidad de masa suficiente como para acelerar, por reacción, la parte interior de la microcápsula, donde se ubica el deuterio-tritio. Este implosiona hacia el centro de la micropastilla con objeto de alcanzar condiciones de fusión.

Los haces confinantes son por tanto elementos indispensables y primigenios en este método de confinamiento, y sin ellos resulta ocioso plantearse esta posibilidad.

¿Existen realmente generadores capaces de producir haces confinantes con

la potencia suficiente y la energía por pulso requerida para comprimir deuterio-tritio y calentarlo hasta las condiciones de fusión?

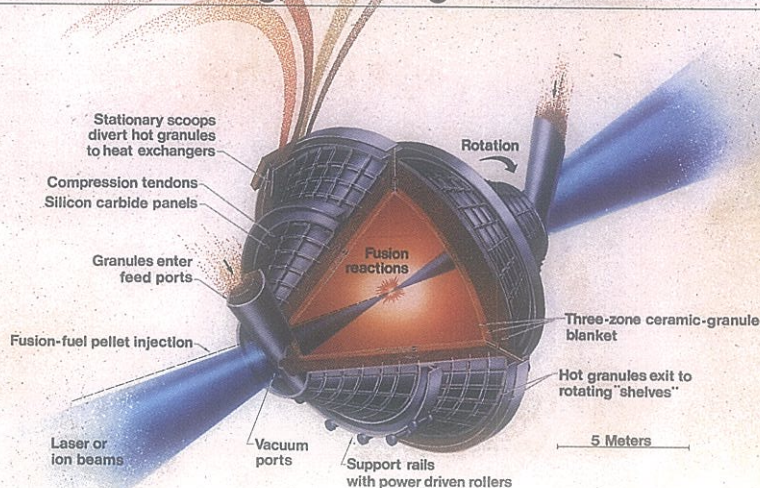
Se mencionó en la introducción de este artículo que varios pioneros de estas investigaciones comenzaron a considerar esta posibilidad tras la invención del láser. El láser permite convertir energía de diversa procedencia (eléctrica, química,...) en energía electromagnética (esto es fotones) colimada y monoenergética. La condición de colimación es importantísima para poder dirigir esa energía hacia el lugar de interés, que en nuestro caso es la cápsula de fusión. El láser es por tanto una herramienta que permite apuntar hacia una zona muy diminuta del espacio y depositar en ella gran cantidad de energía, aunque en el proceso de generar dicha energía fotónica colimada hayamos tenido un rendimiento realmente pobre, que en las máquinas actuales de alta potencia no alcanza el 1%, aunque las previsiones de los nuevos diseños de láseres de alta potencia aseguren rendimientos ligeramente por encima del 5%.

Los láseres son una herramienta multipropósito que puede utilizarse para muy diversos fines, en función de su potencia y longitud de onda fundamentalmente. Pueden encontrarse láseres en cirugía en aplicaciones metal-mecánicas, como pueden también encontrarse en la industria energética, concretamente para la investigación de la Fusión por Confinamiento Inercial, para lo cual se han construido los láseres más potentes del mundo. En la actualidad, el láser más potente es el NOVA del Lawrence Livermore National Laboratory, en California, con 100 kilojulios por pulso en su luz natural (de 1,05 micras, por tratarse de un láser de cristal dopado con neodimio). A ese mismo tipo de láseres pertenecen los de los laboratorios de Limeil (en las cercanías de París, con 20 kilojulios por pulso) y de la Universidad de Osaka (también de 20 kilojulios por pulso).

Las técnicas de multiplicación de frecuencia fotónica gracias a cristales ópticamente activos de características no lineales, posibilita que la luz láser sea convertida con un rendimiento bastante alto en luz de frecuencia doble, triple o cuádruple de su luz original. Hoy día la mayor parte de los experimentos en estos laboratorios no se realizan con la luz infrarroja cercana original, de 1,05 micras de longitud de onda, sino con su segundo o tercer armónico, que corresponde a luz verde y azul respectivamente. El acoplamiento de este tipo de luz con el plasma caliente que se origina en el exterior de la microcápsula es mucho más eficiente, y permite compresiones y calentamientos más elevados. La física de los cristales ópticamente activos como son los KPD es ciertamente interesante y se encuentra en la punta de lanza de muchas investigaciones ópticas.

En la Unión Soviética hay varios láseres de alta potencia, entre ellos el Iskra-5,

Cascade: A rotating, ceramic-granule-blanket reactor



Cortesía del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore.

en la ciudad hasta hace poco secreta de Arzamas-16. Este láser de configuración distinta a los anteriores, basada en desexcitaciones de iodo, produce también luz infrarroja en el espectro cercano, y su energía por pulso es de unos 70 kilojulios.

Existen otros láseres de considerable importancia por su calidad, si no por su potencia. Tal es el caso del láser Omega de la Universidad de Rochester, constituido por 32 haces convergentes de luz de 1,05 micras, o de su segundo o tercer armónico, como ya se ha mencionado. Este es un láser de 1 kilojulio por pulso, de muy alta calidad en la consecución de iluminaciones perfectamente esféricas en microbolitas del orden del milímetro de diámetro. Asimismo se encuentra un láser de alta calidad en el Laboratorio LULI de l'École Polytechnique de París, donde se han realizado experimentos muy interesantes del mejor acoplamiento del láser con la implosión de la microcápsula para luces convertidas al cuarto armónico, es decir 0,25 micras, lo cual corresponde al ultravioleta cercano.

Por lo que corresponde a los **haces de iones**, en principio hay que hacer una clara distinción entre iones ligeros e iones pesados, no tanto por su interacción básica con la materia como por la metodología de producción de estos iones.

En el caso de **iones ligeros**, los pulsos se producen en un diodo de configuración especial, alimentado por una línea de muy alta tensión formada por placas o semicilindros de conductor, a través de la cual descarga un banco de condensadores de muy alta potencia, que se cargan en paralelo y se descargan súbitamente en serie. Cuando la descarga llega al diodo, se produce una fuerte extracción electrónica e iónica, y como consecuencia del arco voltaico aparece un haz de iones ligeros, por ejemplo protones o iones de litio, que puede ser enfocado gracias a la acción de campos electromagnéticos con la configuración deseada. A este tipo de instalaciones pertenece el acelerador PBFA-II del Laboratorio Nacional de Sandía en Nuevo México, una máquina capaz de producir pulsos de un megajulio de energía, desgraciadamente con características de calidad no excesivamente buenas en cuanto a su capacidad de enfocar en volúmenes microscópicos. Precisamente estas dificultades de enfoque hacen pensar que los haces de io-

nes ligeros solo podrían utilizarse para el método denominado de iluminación indirecta; éste es, haciendo incidir dichos haces en unos cuerpos radiadores, que adquirirán muy alta temperatura y emitirán radiación térmica que se debería confinar en un microhorno dentro del cual se hubiera instalado la microcápsula. La microcápsula por tanto no estaría afectada directamente por los iones ligeros sino por el campo de radiación térmica producido por la interacción de éstos con los radiadores térmicos (que pueden fabricarse de plomo o de oro, por ejemplo).

En cuanto a los iones pesados, su producción se puede hacer en aceleradores de diseño convencional en la física de altas energías, consistentes en tubos longilíneos de aceleración en los que se suceden linealmente dipolos de aceleración con la polaridad adecuada para que los pulsos de iones vayan acelerándose progresivamente. La polaridad se invierte en cada dipolo cientos de millones de veces por segundo, por los cortísimos tiempos de tránsito de los iones, por lo que éstos aceleradores son denominados de radiofrecuencia (frecuencias típicas de centenares de MHz).

Asimismo pueden utilizarse otro tipo de aceleradores llamados de inducción, que permiten acelerar corrientes mayores, aunque con menores voltajes. Esta última magnitud no es habitualmente la problemática para generar haces de iones utilizables en fusión por confinamiento inercial, pues los aceleradores actuales realmente pueden alcanzar energías por partícula (en definitiva, voltajes de aceleración) más de mil veces superior a la que se requiere para Fusión por Confinamiento Inercial. El caballo de batalla fundamental está precisamente en la intensidad de la corriente, que es extraordinariamente pequeña en los aceleradores de investigación de física de altas energías, y debería ser muy grande, del orden de kiloamperios,

en los sistemas para generar haces confinantes de FCI.

El interés de los aceleradores de inducción radica precisamente en su capacidad de aumentar la corriente del haz acelerado sacrificando en cierto modo el voltaje de aceleración. Estos aceleradores funcionan según el principio de inducción electromagnética, y esquemáticamente mucho su funcionamiento podría decirse que, en ellos, el haz iónico acelerado hace las veces

de circuito secundario de un transformador de alta frecuencia y potencia relativamente baja.

Desafortunadamente, la carestía de los aceleradores de iones pesados de alta corriente ha hecho imposible hasta la fecha la construcción de máquinas de este tipo, pero sin embargo esta línea se beneficia de la magnífica ejecutoria, que data ya de más de 60 años, de los aceleradores de partículas típicamente usados en la física de altas energías. La estructura e ingeniería de estos aceleradores está sobradamente conocida, y sus capacidades y limitaciones también. Es público y notorio que estas máquinas son muy caras, y ello ha sido su principal talón de Aquiles, como quedó de nuevo demostrado cuando el gobierno del Presidente Clinton anuló la construcción del SSC en Texas, cortando las alas a un proyecto extraordinario de investigación sobre física fundamental, que desgraciadamente resultaba muy caro por el acelerador que había que construir.

En Europa existe un laboratorio dedicado a la investigación de iones pesados, el GSI de Darmstadt, orientado fundamentalmente a la física básica y a la obtención de superelementos, de número Z mayor de 110. En dicha instalación se han realizado algunos experimentos relevantes para caracterizar la interacción de los iones pesados con la materia, en condiciones análogas a las que habría en la Fusión por Confinamiento Inercial. Desgraciadamente, ni la intensidad de los haces ni el dinero destinado a dichos experimentos ha sido hasta la fecha suficiente como para obtener una evidencia concluyente de la física de esas interacciones y su utilizabilidad en Fusión por Confinamiento Inercial, si bien es cierto que las investigaciones teóricas son optimistas, y hasta ahora éstas no han sido contradichas por los resultados experimentales.

Se han realizado diseños, tanto en EEUU como en Europa sobre grandes aceleradores de alta intensidad de corriente, para estos fines. En ello es particularmente activo el laboratorio Lawrence Berkeley, de la Universidad de California, y asimismo el equipo europeo fundamentado básicamente en el mencionado GSI y en algunos grupos del CERN.

Con la experiencia adquirida hasta la fecha en estas instalaciones, se puede concluir que es posible generar y transmitir haces confinantes de alta intensidad, y que resulta más difícil, pero asimismo accesible en instalaciones de alta calidad, producir iluminaciones esféricamente perfectas. Con estas cuestiones ya probadas, y con la respuesta encontrada para muchos interrogantes sobre la física de la microcápsula, en el Laboratorio Lawrence Livermore y en el Laboratorio Limeil-Valenton se está estudiando con rigor cual debe ser la proyección futura de las investigaciones en este campo.

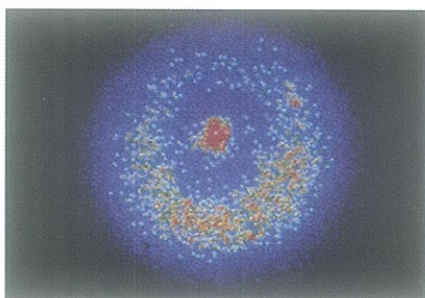
Programas de investigación de FCI

Dos países tienen relativamente bien establecido su programa de investigación en Fusión por Confinamiento Inercial, aunque las circunstancias de política científica y económica de ambos países, y del mundo en general, no sea la más propicia para establecer acciones de investigación a largo plazo. Estos países son EEUU y Francia.

En EEUU, la piedra angular del futuro programa de investigación en FCI es el National Ignition Facility, actualmente en fase de definición y diseño, para lo cual se han presupuestado 61 millones de dólares. El NIF, como habitualmente se le denomina, muy posiblemente se emplazaría en el Lawrence Livermore National Laboratory, aunque otros laboratorios norteamericanos, como el de Los Alamos y el de Sandía, ambos en Nuevo México, también son candidatos para la edificación de este nuevo laboratorio. Las cifras macroscópicas del laboratorio hablan de una inversión total de unos 1.000 millones de dólares, para construir un láser con capacidad para generar una energía por pulso de alrededor de 5 megajulios. Este láser sería casi con toda seguridad de cristal dopado con neodimio, pero tendría una configuración de amplificadores de la luz láser totalmente distinta de la habitual hasta la fecha, y se verificarían múltiples pasos de la luz láser por cada amplificador, lo cual contribuiría a aumentar su rendimiento energético. Por otra parte, también se rediseñarán los sistemas de bombeo óptico para invertir la población electrónica en el neodimio, que sirve posteriormente para provocar las desexcitaciones láser. Con estas mejoras sustantivas, pero que no contemplan todas las posibilidades futuras de desarrollos de láseres, se podría llegar a un 5% de rendimiento. Si en un futuro a más largo plazo se pueden utilizar otros sistemas

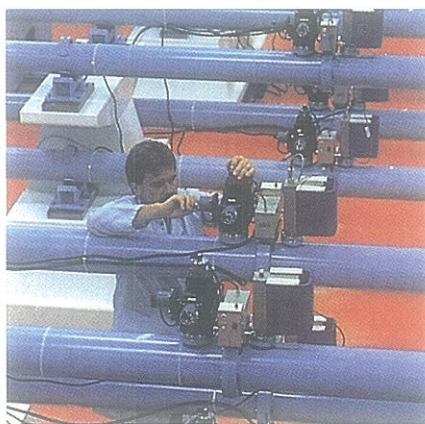


La cámara anticátodo constituye el núcleo de una estructura masiva que sostiene los espejos para guiar los rayos láser.



Los rayos X se utilizan para determinar la uniformidad de la irradiación láser en una grana de combustible. La imagen muestra la implosión de granas apuntadas que han sido irradiadas con rayos láser superpuestos.

El impulso láser pasa por una serie de amplificadores y filtros espaciales diseñados para eliminar la luz incoherente. Aquí, un ingeniero manipula los puntos de luz en el filtro espacial final.



de bombeo (no ópticos indiscriminados como los actuales) podría aumentarse, e incluso duplicarse, dicho rendimiento energético, que es una de las facetas fundamentales desde el punto de vista tecnológico que tiene que abordar el NIF.

El NIF estará ideado como un laboratorio multipropósito y abierto a usuarios externos, incluyendo usuarios internacionales para algunas facetas de investi-

gación no clasificadas. El Gerente del proyecto Bill Hogan (anteriormente citado en relación con el libro de Fusión del OIEA) ha realizado algunas invitaciones previas sobre este tema para conocer el estado de opinión de la comunidad científica internacional interesada en estas experiencias. La reacción ha sido realmente muy favorable, pues se estima imprescindible la colaboración internacional en este ámbito con objeto de obtener sinergias y alcanzar lo antes posible la ignición. Para ello existen múltiples alternativas, todas las cuales requieren investigación adicional tanto teórica como experimental, y el NIF será un marco para validar estas opciones.

Acerca del proyecto del National Ignition Facility, Victor Reis, Secretario Adjunto del Departamento de Energía para Programas de Defensa de EEUU, ha calificado este Programa como el más importante de su Departamento a partir de 1.996. Es sabido que la cámara de representantes está considerando la posibilidad de proponer la desaparición del DOE, con objeto de realizar recortes en el gasto público, pero estos recortes no afectarían al NIF ni a los programas relacionados con los laboratorios nacionales norteamericanos, que pasarían a depender más directamente del departamento de Defensa.

Algunos de los aspectos claves del NIF están clasificados, por las razones mencionadas al principio de este artículo, y particularmente lo están aquellos que se refieren a la hidrodinámica de la radiación de los blancos de iluminación indirecta y a las ecuaciones de estado y demás datos materiales de los elementos químicos más pesados de la tabla periódica.

Dejando al lado estas cuestiones clasificadas, el NIF abre tres amplios campos de trabajo: la energía de fusión, que está declarada como el objetivo primordial junto al de seguridad nacional (que es el clasificado), el desarrollo de investigaciones científicas básicas, y las cuestiones de desarrollo tecnológico y proyección de estos desarrollos a otras tecnologías o campos.

Por lo que corresponde a la cuestión de energía de fusión, el NIF permitirá, si se cumple lo proyectado, obtener microexplosiones de fusión con una liberación energética próxima a los 100 megajulios por microexplosión, utilizando microcápsulas con uno o dos miligramos de deuterio-tritio. Si realmente estos datos se logran, se habría demostrado en laboratorio la factibilidad científico-tecnológica de fusión por confinamiento inercial, y de ahí que se considere el NIF como la piedra angular del programa de investigación de FCI en Norteamérica.

Por lo que corresponde a la investigación científica básica, el NIF permitirá producir condiciones de materia similares a las que se encuentran en el centro del sol y otras estrellas. La ventaja de este laboratorio es que con sus equipos de diagnóstico permitirá caracterizar perfectamente las condiciones de materia

mencionadas, y analizar los regímenes de alta densidad de energía que no son alcanzables por ningún otro método. Ello mejorará los conocimientos de astrofísica y permitirá una comprensión más detallada de la evolución estelar y por ende de la física de nuestro universo.

Otros campos en los que las investigaciones científicas básicas pueden beneficiarse del NIF son, por ejemplo, la física de plasmas de altas densidades, la hidrodinámica de la radiación, la ciencia de materiales, la utilización de fuentes de rayos X coherentes y no coherentes, y las cuestiones de óptica no lineal.

Esta última rama es particularmente importante para futuras aplicaciones que aún están por descubrir. Por ejemplo, fue una firma comercial industrial de California, fundamentalmente orientada a trabajar para el programa de láseres del Laboratorio de Livermore, la que fabricó los equipos ópticos correctivos que permitieron auto-arreglar el telescopio Hubble, que está proporcionando datos de extraordinaria importancia para el entendimiento de nuestro universo y su evolución.

Otra técnica procedente de las investigaciones de FCI que está siendo considerada para nuevas aplicaciones es el llamado *chip radar*, esto es un radar de tamaño microscópico que puede tener aplicaciones revolucionarias incluso para la seguridad de los vehículos automóviles terrestres, puesto que puede controlar la distancia con otros objetos y particularmente con los automóviles precedentes. Lo que hoy es simplemente una aplicación curiosa derivada de las revolucionarias técnicas electrónicas de control de haces láseres ultrapotentes, puede convertirse en el siglo XXI en una herramienta convencional a bordo de los vehículos, para evitar accidentes.

Estas últimas cuestiones de aplicaciones o derivaciones tecnológicas procedentes de FCI han sido puestas en evidencia por los científicos del Laboratorio Nacional de Livermore para hacer aun más atractivo el programa NIF, dado que las tecnologías emergentes que aparecerán alrededor de este programa pueden tener repercusiones comerciales importantes, a lo cual parecen sensibles los dirigentes norteamericanos de hoy día.

Ahora bien, al margen de estas sensibilidades políticas más o menos circunstanciales, el NIF se apoya sobre todo en una serie de experimentos realizados anteriormente en un ambiente ciertamente curioso y por supuesto totalmente calificado: la utilización de una minúscula fracción de la radiación emergente de explosiones atómicas subterráneas para iluminar microcápsulas de FCI y producir en ellas microexplosiones similares a las que se obtendrían en un laboratorio como el NIF. Esto se llevó a cabo a finales de los 8 y principios de los 90 en el programa denominado Centurion Halite, del cual se desconocen prácticamente todas las circunstancias y datos, salvo los *resultados finales*, que podrían resu-

mirse en la frase muy optimista de que la *Fusión por Confinamiento Inercial* es posible.

Los experimentos Centurion Halite debieron parecerse mucho, esquemáticamente, a la explicación siguiente. De una explosión nuclear subterránea se utiliza una parte de su radiación electromagnética inicial (que precede en centenas de nanosegundos a la onda de choque) para alimentar un microhorno de radiación térmica, como el expuesto en el punto 2 de este artículo (Física de la Microcápsula). Dentro de este horno de radiación térmica isótropa, se colocaba previamente una minúscula cápsula de deuterio-tritio con el revestimiento necesario en el exterior. La llegada del pulso electromagnético inicial provocaba la activación del microhorno y a su vez la ablación súbita del revestimiento de la microcápsula. La reacción hidrodinámica deuterio-tritio era una fuerte implosión por la que se alcanzaban condiciones de densidad y temperatura propicias para desencadenar la fusión termonuclear en su seno. Todo ello podía monitorizarse y registrarse adecuadamente antes de que la onda de choque perturbara el experimento y lo fragmentara. Los registros de ese experimento parecen indicar sin ningún género de dudas que con un microhorno de radiación térmica isótropa se puede producir la ignición de una microcápsula de materia fusible, obteniéndose un quemado de este material del orden del 40%. Ello permitiría producir del orden de los 140 megajulios de microexplosión por miligramo de deuterio-tritio inicialmente existente en la microcápsula.

Los buenos resultados del programa Centurion Halite son la base sobre la que se erige la idea del NIF, aunque haya que reconocer también los otros aspectos mencionados, tanto científicos como tecnológicos, relativos a las investigaciones anteriores del Lawrence Livermore National Laboratory en el láser NOVA; y en su anterior versión, el Novette, y en los primeros láseres como el Argus y el Shiva.

Tanto los desarrollos de láseres de cristal de neodimio como la experiencias de ignición en microcápsulas de fusión en el programa Centurion Halite, conforman un conjunto de evidencia experimental y teórica que da sentido a un programa de Fusión por Confinamiento Inercial sólidamente presupuestado. Si las condiciones presupuestarias realmente se mantienen y no ocurren recortes tan drásticos y dramáticos como el que llevó a la cancelación del proyecto del SSC en Texas, hacia finales de siglo podría obtenerse en laboratorio y de forma controlada, la ignición de microcápsulas de Fusión por Confinamiento Inercial, con ganancias de energía sensiblemente superiores a la unidad.

El programa francés de FCI es sensiblemente paralelo al programa norteamericano, y si bien en 1990 iba con considerable retraso respecto de éste, ha experimentado una aceleración impor-

tante en estos últimos años, entre otras cosas por el acuerdo bipartito EEUU-Francia para intercambiar información y compartir desarrollo tecnológico en este campo.

Es imposible saber si la Dirección de Aplicaciones Militares (DAM) del Commissariat d'Energie Atomique dispone de todos o parte de los resultados del Centurion-Halite, pero podría aventurarse de que al menos estas autoridades conocen datos suficientes como para apostar por un proyecto de FCI de alcance similar al NIF norteamericano.

El programa francés ha estado congelado en sus decisiones fundamentales hasta las elecciones presidenciales por el carácter estatal, más que gubernamental que poseen las investigaciones nucleares en Francia. Una vez acabada la campaña electoral y en ejercicio ya el nuevo presidente de la República, todo parece indicar que los presupuestos de la DAM del CEA serán aprobados y que un laboratorio similar al National Ignition Facility se construirá en el Laboratorio de Bruyères-La Châtel, al sur de París, lugar donde el CEA dispone ya de un centro importante con equipos de muy alta tecnología, como son láseres de electrones libres, máquinas de potencia pulsada y otros. El paralelismo entre el proyecto norteamericano y el francés se hace aun más patente cuando se tiene en cuenta que el núcleo que está soportando el programa francés es el equipo de Limeil-Valenton, centro éste que mantiene relaciones muy estrechas con el Laboratorio Lawrence Livermore. De hecho, muchas de las aplicaciones realizadas en Limeil-Valenton se comprueban en Livermore, y viceversa.

Las características macroscópicas del láser de Bruyères-La Châtel son muy similares a las del NIF norteamericano aunque podrían ser ligeramente rebajadas con objeto de acomodarlas al presupuesto existente. Por ejemplo, se habla de 1,5 ó 2 MJ por pulso (en vez de 5 a 10 MJ).

En el número de abril de 1995 de la revista CHOCS, editada por el CEA, el Director de Aplicaciones Militares del CEA, Dr. Bouchard, recuerda en el editorial que hace una treintena de años la DAM comenzó su programa de desarrollo de láseres de gran potencia para su utilización para el estudio de plasmas densos y calientes. Un hito importante en esas investigaciones fué la detección en 1969, y prácticamente por primera vez en el mundo, de una importante emisión de neutrones de 2,45 MeV, resultante, sin ambigüedad, de la fusión nuclear entre deuterones, habiéndose obtenido éstos gracias a un láser de 50 julios, actuando sobre unos blancos diminutos de deuterio criogénico.

El Dr. Bouchard recuerda también lo que supuso para el avance de sus investigaciones la puesta en funcionamiento del láser PHEBUS en el Centro de Estudios de Limeil-Valenton en 1986, pues desde entonces es el láser de

mayor potencia en Europa y ha permitido a la DAM realizar importantes contribuciones tanto en los aspectos básicos de la fusión como en las cuestiones tecnológicas. Por ejemplo, entre éstas, la utilización de fibra de óptica para mejorar la uniformización de la densidad de potencia superficial del láser en su sección recta.

Aunque el láser PHEBUS ha sido utilizado fundamentalmente para análisis de microcápsulas de iluminación indirecta y para el estudio de la isotropización de la radiación térmica, este láser también se ha utilizado para fines más directamente ligados con la energía de fusión por confinamiento inercial.

Más aún, utilizando presupuesto de la Unión Europea, de su programa de "Acceso a Grandes Instalaciones", el CEA ha ofrecido la utilización del PHEBUS a los grupos europeos de investigación en este campo. La primera campaña bajo esta modalidad se realizó en 1994, seleccionándose por parte de un jurado internacional dos experimentos, cada uno de unas dos semanas de duración (pues cada experimento requiere decenas de pulsos láser para iluminar decenas de microblancos diversos) quedando seleccionados dos experimentos, procedentes respectivamente del Imperial College (Blackett Laboratory) de Londres y del Instituto de Fusión Nuclear de la E.T.S.I.I. de la Universidad Politécnica de Madrid. Para la campaña de 1995 se han selecciona-

do otros tres experimentos para realizarse en el PHEBUS, uno de los cuales es también propuesto por el Instituto de Fusión Nuclear de la UPM.

Conclusión

Puede parecer prematuro hablar de conclusiones en un área de investigación que está comenzando a despegar, pero las realidades experimentales, los programas nacionales establecidos en los países más avanzados, y las investigaciones teóricas llevadas a cabo con ayuda de simulación computacional forman un marco de referencia sobre el que cabe realizar algunos comentarios que casi podrían tener categoría de conclusiones.

En primer lugar, la Fusión por Confinamiento Inercial evidencia unas características intrínsecas que la hacen extraordinariamente atractiva no solo como desafío científico integral sino como potencial fuente de energía para un futuro no muy lejano. Esas características intrínsecas se basan en la enorme energía específica liberada en las reacciones de fusión y en la confianza que proporciona el buen nivel de conocimientos teóricos sobre la práctica totalidad de los fenómenos involucrados.

La Fusión por Confinamiento Inercial se desarrollará como una tecnología avanzada y compleja, pero ello no quiere decir inabordable. Precisamente el propio atractivo que tiene como tecnología

avanzada es la mejor garantía de que con mayor o menor velocidad habrán de proseguirse estas investigaciones. Ni que decir tiene que lo que deseamos los científicos involucrados en este campo (rigurosamente convencidos de que apostamos por algo factible) es que el apoyo presupuestario a estos programas sea estable y significativo, sin los altibajos e indecisiones de estos últimos años. Alguno podría preguntarse cual podría ser el papel de nuestro país en un campo de investigación presumiblemente tan complejo, cuando nuestra tecnología no parece estar en la punta de lanza que exigen estos desarrollos. Creemos que ese derrotismo es inaceptable, y que España puede jugar a través de sus científicos un papel correcto en el seno de la Unión Europea, y tener capacidades disponibles para incorporarse a los proyectos emblemáticos que en este campo habrá, en un futuro no muy lejano. Recurriendo a un símil tradicional, digamos que resulta muy difícil, por no decir imposible, subirse a un tren en marcha. Lo más adecuado es estar dentro del tren desde el principio y, si se puede, coadyuvando a que la locomotora funcione. En un proyecto de investigación, la locomotora no solo son los presupuestos y los programas de grandes inversiones en equipos experimentales. La locomotora se ha de alimentar de ideas, y en el terreno de las ideas científicas y técnicas tendríamos que ser capaces de aportar algo.



LA GERENCIA DE RIESGOS EFICAZ

INGENIERIA Y GERENCIA DE RIESGOS

- Más de veinticinco años de *experiencia* nos avalan con la mayor y más importante cartera de riesgos industriales en España.
- La experiencia y profesionalidad de nuestro equipo técnico, nos ha permitido contar con la confianza de los principales *grupos* del sector *eléctrico nacional*.
- Nuestro Departamento de Gerencia de Riesgos ofrece un servicio integral de consultoría y asesoramiento en el tratamiento de los riesgos, tanto en lo que se refiere a su protección física (seguridad industrial), como a su protección financiera (seguros).

NUESTROS SEGUROS

- Diseño de Planes de Seguros Integrales a la medida de cada cliente.
- Nuestros seguros se adaptan a las necesidades de cobertura de cada empresa, abarcando desde las garantías básicas, a aquellas que requieran de un tratamiento más sofisticado.

Delegación CATALUÑA/BALEARES
c / Aragón, 264 - 1º 1ª
08007 BARCELONA
Tfno.: (93) 215 13 86
Fax: (93) 215 88 31

Sede CENTRAL
c / Padilla, 46
28006 MADRID
Tfno.: (91) 520 95 95
Fax : (91) 576 90 47