Este artículo ha sido realizado por G. Velarde, J. M. Aragonés, M. L. Gámez, C. González, J. J. Honrubia, J. M. Martínez-Val, E. Mínguez, J. L. Ocaña, J. M. Perlado, J. Sanz, U. Schröder, P. M. Velarde, integrantes del Instituto de Fusión Nuclear (DENIM) de la Universidad Politécnica de Madrid

LA FUSION NUCLEAR POR CONFINAMIENTO INERCIAL COMO FUENTE DE ENERGIA

HISTORIA E INTRODUCCION

El descubrimiento de las reacciones de fusión nuclear en el primer tercio de este siglo condujo a la comprensión de los procesos que rigen la evolución estelar y constituyen la fuente originaria de energía en el universo.

El trabajo experimental de Walton, Cockcroft, Rutherford y otros varios, así como las ideas paradigmáticas de Bethe, Eddington y Gamow, permitieron establecer con rigurosa certidumbre que las reacciones de fusión nuclear podrían ser una fuente de energía prácticamente inagotable para la Humanidad.

La principal dificultad para aprovechar estas reacciones de fusión procede de la repulsión culombiana sufrida entre los núcleos atómicos que deben llegar a unirse para formar uno más pesado. Dicha fuerza eléctrica es del orden de cien mil veces más débil que la fuerza nuclear fuerte que une entre sí a los componentes nucleónicos. Sin embargo, esta última es de alcance muy corto, al contrario que la repulsión culombiana que varía según la ley $1/r^2$. El resultado final de este estado de fuerzas es la necesidad de acelerar los núcleos para superar la repulsión eléctrica, lo cual puede conseguirse por diversos medios. Ninguno de los sistemas identificados para esta aceleración han logrado producir hasta la fecha, de una manera controlada, más energía a partir de las reacciones de fusión que las que se requirió para inducir dichas reacciones. Hacia 1950, la fusión termonuclear por confinamiento magnético se identificó como un medio adecuado para producir reacciones de fusión. El trabajo comenzó con la reacción deuterio-tritio que presenta el mínimo umbral en la temperatura requerida para inducir las reacciones, y el plasma fue confinado en instrumentos de geometría diferente con preferencia hacia las cámaras toroidales denominadas tokamaks.

En los sesenta, Basov, Nuckolls y Linhard propusieron separadamente una vía totalmente distinta para explotar la fusión en un reactor: en vez de calentar un plasma infradenso durante tiempos muy largos (medido en escala nuclear) se trataba de comprimir y calentar el combustible de fusión durante menos de 1 ns, lo que debía ser suficiente para obtener más energía que la que se había empleado en producir dicho calentamiento y compresión. Basov, uno de los descubridores del láser, consideró estos instrumentos como herramientas adecuadas para enfocar grandes cantidades de energía en volúmenes muy reducidos. Esta fue la clave para el desarrollo de la fusión por confinamiento inercial, que en cierta medida trata de reproducir la evolución estelar, pero a una escala microscópica en masa y tiempo, y sustituyendo la atracción gravitatoria que induce las fusiones en las estrellas por unos mecanismos externos de compresión que tendrían que ser provocados por agentes adecuados. Se tardaron algunos años en iniciar programas experimentales para comprobar esta idea, pero los resultados han demostrado la aceptabilidad del concepto desde diversos puntos de vista: las predicciones teóricas han concordado muy bien con los datos experimentales que se han ido obteniendo, y la tecnología ha alcanzado un grado de madurez que posibilita el ulterior aumento de energía en los haces de confinamiento, lo cual permite predecir un desarrollo futuro de la fusión por confinamiento inercial que llegue a la construcción de un reactor demostrativo, primer paso para su despliegue comercial.

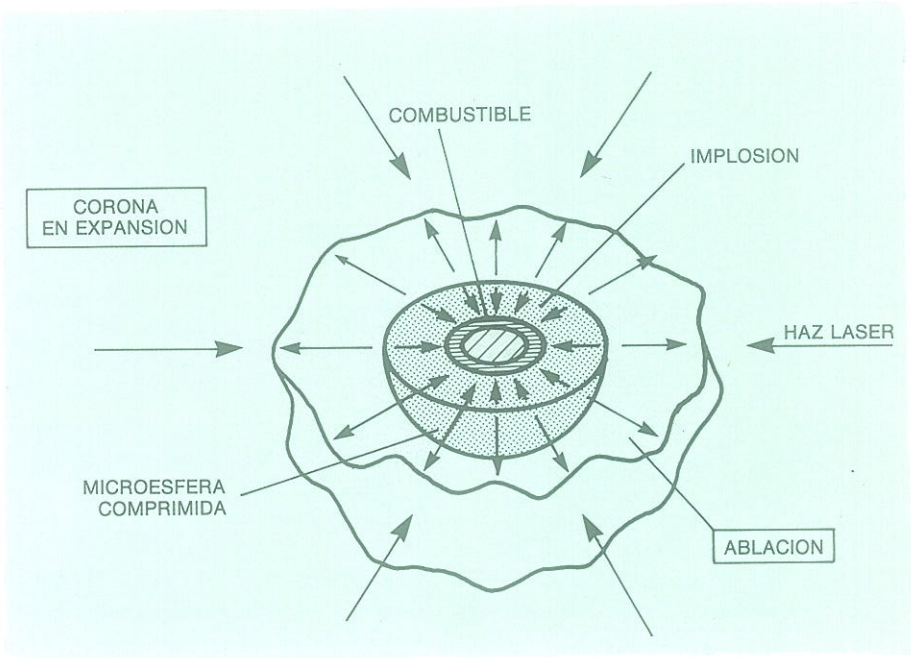
LOS PRINCIPIOS DE LA FUSION POR CONFINAMIENTO INERCIAL

La fusión completa de un miligramo de deuterio-tritio en mezcla estequiométrica produciría 340 MJ. Por otra parte, es posible prever cámaras de reacción capaces de soportar los efectos de microexplosiones de centenares de MJ en operación nomimal, lo que significaría centenares de MW de potencia térmica si una microexplosión de este tipo tiene lugar cada segundo. Esto conduce al concepto de una microesfera conteniendo unos pocos miligramos de deuterio-tritio que se comprime y calienta por la acción de un conjunto de

fotones láseres o de partículas cargadas. El combustible de fusión debe estar rodeado de unas capas adecuadas para optimizar la interacción entre los haces confinantes y la microesfera de tal forma que se obtenga la compresión óptima. La parte más exterior de la microesfera es bruscamente vaporizada la deposición de la energía de los haces confinantes, y como consecuencia del principio de acción-reacción, la parte interna de la microesfera es comprimida hacia el interior en un complejo proceso al final del cual se puede obtener una configuración en la que el deuterio-tritio haya alcanzado densidades miles de veces superiores a la inicial y la temperatura pueda alcanzar 50 millones de °K en la zona central más caliente. Esta configuración duraría alrededor de un nanosegundo en ausencia de reacciones de fusión, y sería seguida por una expansión termomecánica de la microesfera, que se expandiría en el espacio a su alrededor debido a las presiones extraordinariamente altas que se han producido en su interior durante la compresión. Durante el brevísimo período de tiempo anteriormente citado el combustible de fusión permanece confinado a muy altas densidades y temperaturas en una situación en la que es posible que más del 50 % del deuterio-tritio entre en reacción, liberándose la correspondiente energía.

Los resultados de esa microexplosión, que serán básicamente neutrones, partículas α y radiación electromagnética, volarán hacia el exterior con energías cinéticas muy considerables que serán depositadas fundamentalmente sobre la cámara de reacción en la que se contenga la microexplosión. Dicha cámara será un complejo sistema que tendrá que disponer en su interior la óptica para el enfoque de los haces sobre la micropastilla y a su vez habrá de alojar los sistemas de refrigeración que extraigan la energía calorífica producida como consecuencia de la interacción de los productos de fusión con el medio circundante.

Debe reconocerse en este contexto que la fusión deuterio-tritio producirá productos de activación como resultado de las interacciones neutrónicas, pero los niveles de actividad total generada y las vidas medias de los productos aparecidos serán muchísimo más benignos que los de los productos de fisión y actínidos de los reactores de fisión. Más aún, en estos sistemas no habrá posibilidad de accidentes exoenergéticos de reactividad que provoquen la dispersión de importantes inventarios radiactivos, puesto que la máxima potencia alcanzable estará estrictamente limitada por la propia naturaleza del proceso, es decir, por las condiciones de la microexplosión, la cantidad de deuterio-tritio que puede alojarse en una microesfera y la energía total de los haces confinantes.



Las reacciones de fusión ocurren en la parte central del blanco. Las capas más externas son bruscamente evaporadas por la deposición de energía de los haces confinantes. Las fuerzas de reacción dirigidas hacia el centro comprimen y calientan el combustible, produciendo unas condiciones térmicas en la materia bajo las cuales las reacciones de fusión deuterio-tritio son posibles.

Por otra parte, debido a que el 0,35 % de la masa reaccionante se convierte en energía, esta fuente energética será órdenes de magnitud más fuerte que cualquier otra fuente explotada hasta la fecha. Este aserto puede caracterizarse por un ejemplo: el deuterio contenido en el agua del mar hace que 1 kg de este agua equivalga a 300 kg de petróleo.

Conviene sistematizar cualquier aproximación a la fusión por confinamiento inercial distiguiendo entre sus tres áreas fundamentales: los **haces confinantes** que producen la compresión de la microesfera, la evolución física de la **microesfera** en sí, incluyendo las reacciones de fusión, y las **cámaras de reacción** en las cuales dichos productos de fusión tendrán que depositar su energía, transformándose en energía calorífica que posteriormente pueda ser convertida a otras formas energéticas. En los epígrafes siguientes se analizan estas tres áreas, teniendo en cuenta la situación actual, las investigaciones precedentes y las perspectivas futuras.

¿COMO INDUCIR LA FUSION POR CONFINAMIENTO INERCIAL?

El requerimiento básico de la fusión por confinamiento inercial es la capacidad de colimar cantidades importantes de energía en una dirección precisa que esté enfocada precisamente sobre la microesfera de deuterio-tritio. Esto puede obtenerse a través de láseres (es decir, fotones monoenergéticos, colimados y en fase) o a través de iones (acelerados y enfocados por campos electromagnéticos). En ambos casos la cantidad de energía colimada es una fracción limitada de la cantidad total de energía que se ha usado para activar bien el sistema láser, bien los aceleradores de iones, pero se espera que la multiplicación de energía que ocurra en el seno de la microcápsula sea suficiente como para compensar este rendimiento energético que normalmente es muy inferior a la unidad. Si se denomina por η el rendimiento de generación de los haces confinantes, por G la multiplicación de energía que se produce en la microexplosión, por ε el rendimiento de conversión de energía térmica a eléctrica y por ρ la fracción de recirculación de electricidad requerida para alimentar los haces de confinamiento, se obtiene la ecuación elemental: $\eta G \varepsilon \rho = 1$. Puesto que ρ debe ser considerablemente menor que la unidad para satisfacer los requisitos comerciales, se sigue, pues, que el producto $\eta G \varepsilon$ debe ser mucho mayor que la unidad. Si se adopta un valor de $G \sim 100$, que es el predicho por la mayor parte de los análisis teóricos, se podrían utilizar haces de confinamiento cuyo rendimiento específico fuera superior a 1 %, puesto que ε sería del orden de 0,40 en cualquier caso. El problema de conseguir una multiplicación energética de 100 o más está, sin embargo, muy directamente relacionado con la energía total que los ha-

ces confinantes pueden depositar sobre la microesfera. Los antedichos análisis teóricos y las simulaciones numéricas realizadas con computador identifican la existencia de una energía umbral en los haces confinantes, por debajo de la cual la multiplicación es prácticamente nula y por encima de la cual la multiplicación sube rápidamente a valores próximos y superiores a 100. Este umbral, por supuesto, no es un valor constante, sino que depende de numerosas variables como la propia calidad del haz confinante (perfil temporal, energía por partícula, tipo de partícula) así como de la estructura de la microesfera. Está claro pues que resulta imprescindible optimizar tanto esta estructura como las especificaciones de los haces confinantes para reducir dicho umbral al mínimo posible, dado que en este punto es donde radica la mayor dificultad tecnológica hasta la fecha, a saber, conseguir energías por pulso suficientemente altas en los diversos haces confinantes que se han identificado, y a los cuales se van a dedicar los párrafos siguientes.

LASERES

Los láseres se basan en la transición estimulada de niveles moleculares atómicos o nucleares previamente excitados respecto de la población original, lo cual produce un haz de fotones colimados y monocromáticos, cuya energía depende lógicamente de la transición (o decaimiento) que se haya experimentado. Las excitaciones moleculares producen luz infrarroja visible o ligeramente ultravioleta, mientras que las excitaciones atómicas proporcionan radiación X y las nucleares radiación γ, aunque estas últimas no se han podido obtener en la práctica hasta la fecha, y en las atómicas sólo se haya conseguido efecto láser en circunstancias muy particulares. Junto a la línea clásica de láseres moleculares o interatómicos, una nueva fundamentación para obtener efecto láser es la denominada láser de electrones libres, en el cual un haz de electrones previamente acelerado emite radiación colimada y monocromática al ser decelerado en un campo magnético espacialmente periódico.

Uno de los primeros candidatos como haz confinante de la FCI fue el **láser de CO_2** basado en el decaimiento de las moléculas de CO_2 excitadas vibracionalmente. El mayor inconveniente de este tipo de láseres es su larga longitud de onda, de 10 µm, lo cual hace que su interacción con la microesfera no sea muy eficiente y produzca además electrones supratérmicos que son indeseables para obtener una compresión óptima del material fusionable.

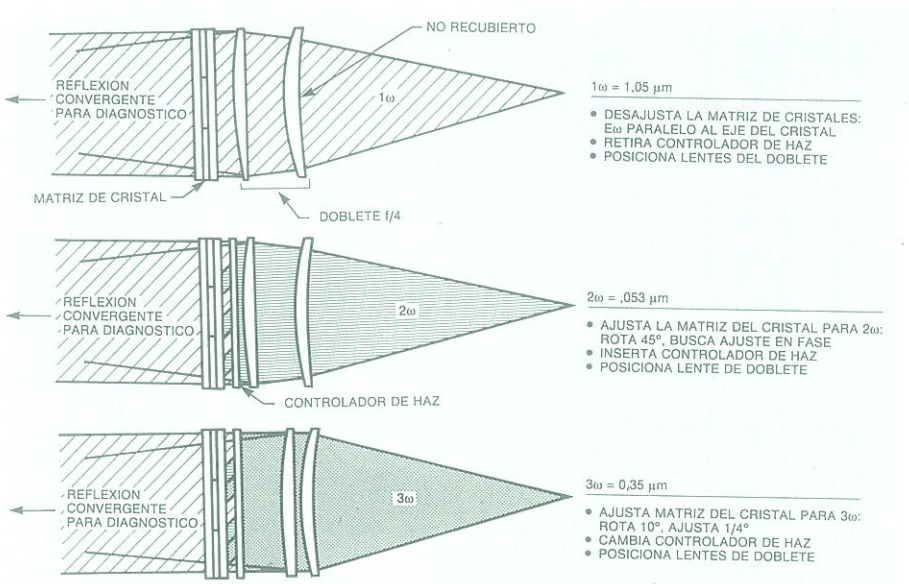
No obstante, se construyó durante la década de los setenta el láser ANTARES, en operación desde 1984 hasta 1986, con 24 haces que convergen en la cámara de reacción y proporcionan 35 KJ de energía por pulso, con una duración de un nanosegundo y una potencia máxima de 40 TW. No obstante, su alto rendimiento intrínseco del orden de un 10 %, las malas condiciones antedichas de interacción con el blanco hacen que prácticamente se haya descartado la posibilidad de proseguir las investigaciones a mayor energía con láseres de este tipo, aunque los instrumentos existentes sean muy útiles de cara a investigaciones de procesos básicos.

Otro candidato de haz confinante desde los primeros momentos fue el láser de **vidrio dopado con Neodimio,** cuya ventaja fundamental era su longitud de onda más corta, de una micra (que todavía es muy larga para obtener alto rendimiento en la compresión de la microesfera) aunque presentaba como desventaja fundamental su rendimiento de tan sólo un 1 %. Debido a que su tecnología era conocida desde principios de los años sesenta, este tipo de láseres se ha desarrollado muy satisfactoriamente en varios países, y gracias a él se han obtenido importantes hitos en el progreso de FCI. Estos se han logrado gracias a las instalaciones tales como el láser NOVA del Laboratorio de Livermore en California, el GEKKO-XII de la Universidad de Osaka o el láser OMEGA de la Universidad de Rochester. El primero de ellos es capaz de proporcionar más de 100 KJ de luz láser de una micra por pulso, y en él, así como en otras dos instalaciones citadas, se han obtenido microexplosiones que han proporcionado más de 10^{13} neutrones, lo que significa un 0,1 % de multiplicación de energía, que si bien está todavía muy lejos de lo que se requiere para el despliegue comercial de la fusión, es sin embargo una cifra prometedora habida cuenta de los niveles de energía por pulso relativamente bajos de los que se han dispuesto, que en el caso del láser OMEGA son del orden de 1 kJ.

Aunque estos láseres, debido a su rendimiento inicial muy pequeño, parecían tener poca perspectiva futura, ha habido dos desarrollos en estos últimos tiempos que abren nuevas expectativas para estos láseres y los proyectan como posiblemente el candidato más sólido en la actualidad dentro de su campo para el inmediato futuro. La primera de estas mejoras radica precisamente en un **aumento del rendimiento** del efecto láser en sí, gracias a las modificaciones en los mecanismos de bombeo a base de lámparas de flash de xenon, así como a la redefinición de la arquitectura del amplificador láser, habiéndose logrado diseñar amplificadores de doble y triple paso de la luz que han permitido obtener rendimiento superiores al 5 %, y se prevé que para un láser de alta energía, del orden de los pocos MJ, se podrían obtener rendimientos de láser de un 10 %.

La segunda mejora sustancial la ha proporcionado la aplicación de los materiales ópticos no lineales, y en particular los que permiten la **duplicación y triplicación de la frecuencia** de la luz láser. Se ha mencionado ya anterior-

Un esquema de la multiplicación de frecuencia de la luz láser. Convenientemente situados y ajustados en fase, los cristales de KDP producen una salida de luz de más corta longitud de onda que es absorbida de forma muy eficiente en procesos colisionales en la capa de ablación del blanco (Fuente: "1981 Laser Program Annual Report". Lawrence Livermore National Laboratory).



mente que para obtener un buen acoplamiento entre la luz láser y la microesfera, con objeto de absorber la mayor cantidad de luz posible y no producir electrones supratérmicos, se requiere una longitud de onda lo más pequeña posible, del orden del azul o ultravioleta, lo cual lógicamente queda lejos de la luz ofrecida por los láseres de vidrio de neodimio, que es luz infrarroja cercana. Sin embargo, existen materiales tales como el fosfato dihidrogenado de potasio (KPD) que, mediante la orientación precisa de sus ejes ópticos, posibilitan la multiplicación de frecuencia o, más exactamente hablando, la suma de dos fotones de frecuencia originaria para dar un fotón de frecuencia doble (mitad longitud de onda).

Mediante esta técnica se puede obtener luz verde a partir de la infrarroja inicial, con un rendimiento del orden del 70 % en dicha conversión. Por otra parte, en un segundo cristal se puede producir la suma de los fotones verdes con los infrarrojos originales residuales, convenientemente polarizados, de tal forma que se obtengan fotones de frecuencia triple (fotones azules) que manifiestan un magnífico acoplamiento con la microesfera de fusión. La mayor parte de los experimentos realizados actualmente, en los cuales se obtienen fluencias neutrónicas superiores al billón de neutrones por microexplosión, se realizan precisamente con luz azul obtenida por esta tecnología.

La importancia de los materiales ópticos no lineales es tal para esta línea de láseres, que aunque dicha área de la física se conocía desde hace más de veinte años, sólo en la actualidad se ha organizado una búsqueda generalizada y exhaustiva de nuevos cristales que presenten propiedades ópticas adecuadas para la obtención de duplicación o triplicación de frecuencia.

Un tercer punto en el que hay que poner énfasis por su importancia para la obtención de los buenos resultados experimentales que se han conseguido con estos láseres es el tema de la **uniformidad de la iluminación** de la microesfera, siempre difícil como consecuencia del empleo de un número limitado de haces. Las asimetrías en la iluminación producen fuertes distorsiones en la compresión de la microesfera hasta tal punto que ésta se parta en trozos en las direcciones de baja intensidad de los haces incidentes, no lográndose, por tanto, la compresión deseada. Para eliminar este problema se han ideado técnicas denominadas de inducción de incoherencia espacial con las que se consigue una uniformización extraordinaria de la intensidad de iluminación en la superficie de la microesfera.

En definitiva, teniendo en cuenta las posibilidades de incrementar el rendimiento de estos láseres, la posibilidad de multiplicar la frecuencia de sus fotones y las técnicas para producir una gran uniformidad en la iluminación de la microesfera hacen que estos láseres se hayan convertido en la herramienta más potente hasta la fecha de investigación experimental sobre fusión por confinamiento inercial.

Una familia de láseres con muy buenas características pero en un estado de desarrollo mucho más primitivo es la de **láseres de excímeros,** y concretamente los de fluoruro de kripton, molécula inestable que sólo se constituye mediante bombeo producido en la cavidad láser por un haz de electrones cuasi relativistas que ceden su energía al medio, formado típicamente por un gas noble (argon, por ejemplo) con un dopado de un 2 % de moléculas de kripton y flúor. Las dos ventajas fundamentales de estos láseres son su corta longitud de onda, de 0,25 μm y su mayor rendimiento, del orden del 12 %. Las dificultades fundamentales que encuentran estos láseres para su desarrollo son de tipo tecnológico, incluyendo la complejidad de la química de los procesos de excitación, las dificultades de conseguir excitaciones homogéneamente distribuidas en la cavidad láser, así como las dificultades de conseguir altas intensidades de luz a partir de un solo amplificador, por lo que se prevén que estos láseres tendrán una arquitectura conformada por un alto número de haces en desarrollo paralelo.

Hasta la fecha, el láser de excímero más importante es el AURORA del Laboratorio Nacional de Los Alamos, que se prevé pueda dar 10 kJ cuando esté en su fase finalizada, utilizando para ello 96 haces que pueden multiplexarse de tal forma que se produzca una iluminación uniforme en la microesfera situada en la cámara de reacción. No obstante sus condiciones básicas muy positivas, este láser, por dificultades tecnológicas, no ha alcanzado todavía el antedicho nivel de energía y prácticamente sólo está operativo a un 50 %. Uno de los problemas tecnológicos que tendrían aún mayor importancia para láseres de superior energía es el problema del daño óptico asociado con la luz ultravioleta que se produce, pues en general, los materiales ópticos usados en espejos y lentes tienen un umbral de daño tremendamente bajo para luz ultravioleta, lo cual implica que para el futuro se tendrán que investigar otros materiales de transmisión y enfoque que permitan mayores intensidades en el haz.

Existen muchas otras familias de láseres que podrían considerarse para fusión por confinamiento inercial, influyendo en este contexto muchos factores, que van desde sus datos intrínsecos básicos hasta las capacidades tecnológicas que se han desarrollado hasta la fecha. Los factores más imperantes a tener en cuenta a este respecto son rendimiento, frecuencia, potencia de pico y anchura de pulso.

Ya se ha mencionado al comienzo de este capítulo el creciente interés en los últimos años por los **láseres de electrones libres,** cuyo medio láser lo constituye un haz de electrones previamente acelerado, que se decelera a lo largo de un campo magnético espacialmente periódico. Bajo condiciones adecuadas de la energía (velocidad) de los electrones y de longitud de onda espacial del campo magnético, se puede obtener la emisión de radiación electromagnética monocromática y coherente, es decir, luz láser, a partir de la deceleración de dichos electrones. Las condiciones que se han de cumplir son realmente estrictas por existir un proceso de resonancia entre la tasa de deceleración, la longitud de onda del campo y la longitud de onda de los fotones emitidos.

Las longitudes de onda de los fotones láseres obtenidos por este método son muy variables, e incluso pueden ser sintonizables en una misma máquina, bien variando la velocidad de los electrones o bien variando la longitud de onda del ondulador (campo magnético variable). Por otra parte, los rendimientos de extracción de la energía de los electrones para ser transformada a radiación láser son considerablemente altos, y en algunos casos (generalmente asociadas a longitudes de onda demasiado largas) se han obtenido rendimientos del orden del 70 % aunque se necesitase en algunos de los experimentos el reciclado de los electrones decelerados para la recuperación casi total de la energía empleada en acelerarlos.

Aunque la teoría de los láseres de electrones libres ha sido establecida con precisión, las aplicaciones prácticas dependen del desarrollo tecnológico que pueda conseguirse tanto en los aceleradores de electrones como en los onduladores.

Resumiendo, pues, el tema de los láseres como posibles haces de confinamiento de FCI, cabe extraer dos conclusiones fundamentales: en primer lugar, que los desarrollos teóricos y experimentales realizados hasta la fecha han demostrado la factibilidad de producir fusiones (aunque todavía en un régimen endoenergético) mediante la iluminación de microcápsulas de FCI; en segundo lugar, que existen varias líneas prometedoras de investigación, cada una de las cuales merecería ser desarrollada en el futuro para poder alcanzar un régimen de reactor demostrativo de FCI, aunque esto suponga lógicamente problemas presupuestarios.

HACES DE IONES LIGEROS

La segunda gran opción para inducir microexplosiones de FCI es el uso de haces de iones ligeros acelerados. La principal ventaja de este proceso es la capacidad tecnológica hoy día existente para acelerar estos iones incluso hasta niveles de energía similares a los que las predicciones teóricas señalan como necesarios para conseguir la condición exoenergética en la FCI. Los dos problemas fundamentales, aún pendientes, son la obtención de altas intensidades de corriente en los haces de iones como consecuencia de las dificultades existentes para su neutralización y enfocado y, sobre todo, la longitud temporal del pulso del haz, que por el momento es muy superior a los tiempos hidrodinámicos característicos de la compresión de las microcápsulas, que es del orden de los 10 ns.

La disponibilidad tecnológica de estos aceleradores y su relativa sencillez ha permitido construir la máquina que hasta la fecha puede dar la mayor potencia por pulso de todas las que se dedican a la investigación de FCI, que es el PBFA-II del Laboratorio Nacional de Sandia en Estados Unidos, que utiliza iones de litio de 35 MV y puede llegar a dar energías por pulso del orden de 1 MJ, aunque con longitudes de pulso del orden de 50 ns. La tecnología que se utiliza es la comúnmente conocida como de potencia pulsada, basada en generadores Marx que son cargados en paralelo y descargados en serie mediante interruptores ultrarrápidos, siendo el pulso conformado posteriormente en una línea de conducción bañada en agua y aplicado a un diodo en el que se extraen y aceleran los iones en cuestión, que mediante un campo magnético son proyectados hacia el interior de la cavidad.

El rendimiento total de estos sistemas es del orden del 10 %, y no es fácil aumentarlo por limitaciones eléctricas intrínsecas. Sin embargo, como razones positivas para el mantenimiento de su desarrollo hay que citar su precio relativamente bajo (a título de ejemplo, el PBFA-II ha supuesto un coste de construcción de unos 50 millones de dólares). Sin embargo, por varias razones relacionadas con las dificultades de obtener pulsos cortos y con las experimentaciones que se están realizando en los interruptores ultrarrápidos por erosión de plasma, no se ha empleado esta máquina para experimentar directamente con deuterio-tritio.

HACES DE IONES PESADOS

Estos haces constituyen la tercera alternativa posible para FCI, aunque hasta la fecha hayan sido los de menor desarrollo experimental por los problemas presupuestarios que conllevan. Los haces de iones pesados requieren aceleradores muy largos, con voltajes totales de aceleración de varios GeV, lo que implica construcciones muy caras para poder obtener haces de iones que sean interesantes para la experimentación de FCI.

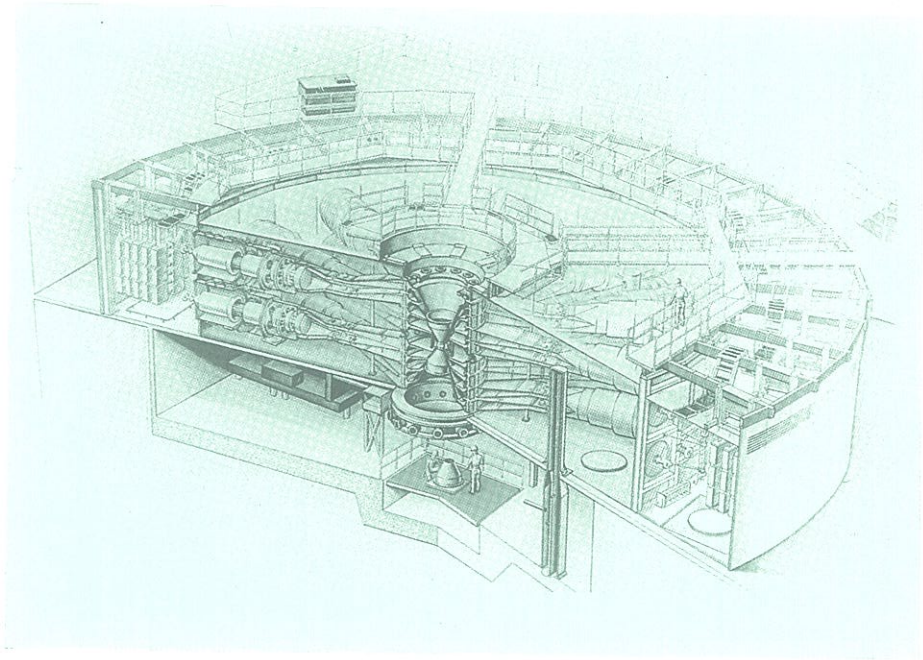
A pesar de esta connotación negativa, esta alternativa tiene la ventaja de que puede beneficiarse de la larguísima historia de investigación y desarrollo sobre aceleradores que se ha realizado hasta la fecha, si bien con la salvedad de que los aceleradores que se han ido construyendo han tenido como objetivo fundamental la obtención de potenciales de aceleración cada vez más altos, con menoscabo de la intensidad de los haces acelerados. En este sentido cabe decir que hoy día se han alcanzado tensiones de aceleración incluso mil veces superiores a los que se necesitarían en la FCI, pero, sin embargo, las intensidades que se disponen en estos aceleradores son muchísimo más bajas, por lo general más de un millón de veces más bajas, que las que serían interesantes para la obtención de confinamiento inercial en una microesfera.

Las ventajas básicas de este concepto son su alto rendimiento, que puede alcanzar un 30 %, su alta tasa de repetición, pues se podrían obtener más de 10 pulsos por segundo, la buena interacción de los iones pesados con la microesfera de fusión y el antedicho conocimiento tecnológico de aceleradores, aun cuando haya sido orientado a investigaciones de física nuclear y de física de altas energías y no propiamente para los requisitos de FCI.

No obstante la carencia de instalaciones experimentales expresamente dedicadas a la fusión, se han hecho numerosos estudios conceptuales basados en los aceleradores existentes que han permitido incluso establecer las ventanas de diseño para un futuro reactor demostrativo de FCI. Dentro de este campo hay dos opciones básicas, la primera basada en aceleradores lineales de radiofrecuencia, y la segunda basada en aceleradores de inducción, también comentados en el mismo contexto. En los primeros es fácil obtener iones pesados de plomo o bismuto del orden de 10 GeV, pero las intensidades son muy bajas. Sin embargo, en los aceleradores de inducción, que funcionan acortando un pulso inicialmente muy largo hasta aumentar la corriente fortísimamente en el pulso resultante, se pueden obtener intensidades más altas aunque el voltaje de aceleración está comprometido para poder elevarlo hasta la cifra antedicha.

En todo caso, y como consecuencia sobre todo de las fuertes inversiones necesarias para su desarrollo, los haces de iones pesados son hoy día más una alternativa teórica que práctica, y subsiste la dificultad de que para poder realizar experimentación adecuada con ellos habría que construir prácticamente ya de modo directo un acelerador que prácticamente serviría para el propio reactor demostrativo, con lo que ello conlleva de riesgo financiero y de política científica en esa inversión.

Ultimamente, sobre la base de estudios de viabilidad avanzados, y con el apo-



El "Particle Beam Accelerator II (PBFA II)" se compone de 36 módulos aceleradores consistentes en bancos de condensadores (generadores Marx), líneas conformadoras de pulso y diodos generadores de haces de iones que rodean la cámara de blancos (Fuente: Sandia National Laboratory).

yo del premio Nobel, Carlo Rubbia, ha sido propuesta la instalación en Europa (Sicilia, concretamente) de un sistema de generación de haces de iones pesados que facilitaría notablemente la cooperación internacional, la investigación desde el punto de vista de conjunción de esfuerzos, y el avance científico y tecnológico en este campo.

MICROESFERAS FUSIONABLES

Estas microesferas son auténticamente el centro de la FCI, en tanto que en su seno van a producirse las fusiones gracias a las cuales se espera multiplicar por cien veces la energía que ha sido necesaria emplear para su comprensión.

Las microesferas pueden categorizarse en dos clases o familias principales: las que se iluminan directamente y las que experimentan una comprensión mediante lo que podría denominarse iluminación indirecta. La diferencia radica en que en el primer caso la interacción de los haces confinantes con el blanco produce directamente la compresión, mientras que en la segunda hay un proceso de conversión interna de energía en la parte externa de la microesfera generándose un campo de radiación interna, típicamente de rayos X blandos, es el campo iluminador que produce auténticamente la compresión interior donde está alojado el combustible. Esto último se realiza para conseguir la mayor uniformidad posible en la compresión del combustible, puesto que las asimetrías en la iluminación, sea ésta directa o indirecta, son desastrosas por producir la ruptura hidrodinámica de la microesfera. Anteriormente se ha mencionado que la uniformidad de la iluminación directa se puede obtener por métodos tales como la inducción de incoherencia espacial en los láseres. Por otra parte, la iluminación indirecta se consigue mediante la disposición de los materiales adecuados en las capas externas de la microesfera, de tal manera que haya una conversión masiva a radiación X-blanda, y sea ésta la que al interaccionar con la parte interna de la micropastilla produzca la comprensión uniforme del combustible.

Esta clasificación previa evidencia que existe un amplio campo de investigación en el diseño de los blancos de fusión, puesto que la estructura material y geométrica con que éstos se fabriquen condiciona considerablemente la evolución interna de la microesfera y, en definitiva, posibilita o no la obtención de condiciones de fusión en el centro.

Para aproximarse sistemáticamente al estudio de las microesferas de FCI suelen distinguirse cuatro etapas en su evolución:

- Interacción del haz confinante con la microesfera.
- Compresión de la microesfera.
- Ignición y propagación de la ignición.
- Quemado y destrucción de la microesfera.

La primera fase depende lógicamente del tipo de iluminación que se va a usar, como ya se ha mencionado. Por otra parte, los materiales que se vayan a disponer en la parte externa de la microesfera dependerán del tipo de haz confinante que se use. Por ejemplo, las microesferas que vayan a ser iluminadas con fotones normalmente tendrán un número atómico bajo, mientras que las microesferas que vayan a ser iluminadas por haces de iones tendrán en la parte exterior típicamente dos zonas, una interna de bajo número atómico y otra externa de alto número atómico que coadyuve al confinamiento del interior, y, por tanto, a la mejor compresión de las zonas fusionables de la microesfera.

En el caso de fotones, la absorción de energía de los haces se produce fundamentalmente en la denominada superficie crítica que se genera en la capa de plasma ablacionado desde la microesfera por la interacción inicial del láser, mientras que los iones penetran en el seno de la microesfera un cierto rango y producen una deposición energética considerablemente volumétrica.

La **fase de compresión** se inicia como reacción a los fenómenos de deposición energética y transferencia de momento que ocurren en la parte exterior, y la evolución en esta fase también depende de las características geométricas y materiales con que se haya diseñado la microesfera. Por lo general tiende a usarse microesferas huecas, en las cuales el deuterio-tritio es la capa más interna, que sufre una fuerte aceleración hacia el interior viajando a velocidades superiores a 10^7 cm/s^{-1}, y produciéndose un calentamiento brusco e irreversible en el momento de cierre del vacío interno, lo cual permite alcanzar la temperatura de ignición en la parte más interna del combustible, mientras que el resto del mismo está a temperatura mucho menor pero a mayor densidad de la que se ha podido obtener en la zona central.

La fase de compresión está fuertemente dominada por la hidrodinámica, incluyendo las inestabilidades de esta naturaleza que pueden desarrollarse como consecuencia de los diversos gradientes de aceleración y de densidad que se dan entre las diversas capas. Al igual que en el caso de las fuertes asimetrías que pueden producirse como consecuencia de iluminaciones no uniformes, y que destruyen la microesfera antes de su compresión, las inestabilidades hidrodinámicas pueden producir una destrucción similar durante esta fase, si no se produce una clara dominancia del movimiento en sentido radial en la hidrodinámica del interior de la microesfera. Durante esta fase se intenta mantener el combustible en su adiabática correspondiente para impedir que sea precalentado por irreversibilidades, dado que el calentamiento redundará en una pérdida de la calidad del confinamiento, y particularmente una reducción de la densidad obtenida. Las condiciones de temperatura alta que inicien las fusiones sólo se obtendrán en principio en la zona central debido al fenómeno altamente irreversible del choque final como consecuencia del cierre del vacío interno, y se prevé que habrá una propagación de la ignición a partir de este punto, calentando rápidamente el combustible circundante que está a mayor densidad.

Esta última fase es, lógicamente, la que antes se ha denominado de ignición y propagación de la ignición, y sobre su interpretación existen aún considerables discrepancias, entre otras cosas por la multiplicidad de diversas microesferas que cabe producir. Por ejemplo, en el caso experimental se utilizan con frecuencia las denominadas microesferas de gas con una lámina externa de alta razón de aspecto, que sufren una evolución hidrodinámica notablemente distinta de la mencionada anteriormente, y que a pesar de obtener un confinamiento inercial del combustible no muy bueno son positivas, sin embargo, para obtener temperaturas de fusión con haces confinantes de energía relativamente baja, incluso de tan sólo 1 kJ.

De cara a las microesferas que podrían usarse en los reactores de FCI se piensa que éstas deben alcanzar una calidad de confinamiento tal que se llegue al orden de unos 4 ó 5 gr/cm^{-2} en el deuterio-tritio comprimido, lo cual es extraordinariamente caro de conseguir, en términos energéticos, si todo el combustible tiene que ser calentado hasta temperatura de fusión, es decir, por encima de los 5 keV. La idea de la propagación de la ignición propagada consiste en alcanzar esta calidad de confinamiento pero llegando a la temperatura de fusión sólo en la parte central, que puede alojar aproximadamante a un 10 % de la masa total de deuterio-tritio. Este 10 % de masa estaría a una densidad notablemente inferior que la del deuterio-tritio que lo circundara, pero a partir de las fusiones que se originarán en su seno se iría calentando el resto y produciéndose nuevas fusiones, llegándose hasta un quemado del deuterio-tritio total que podría llegar hasta el 50 % del material fusionable introducido.

Hasta la fecha, sólo se han podido hacer experimentaciones relevantes de una serie de familias de microesferas, y dichos resultados experimentales han concordado apreciablemente bien con las simulaciones numéricas que se han realizado, salvo en el caso en que por razones hidrodinámicas han imperado inestabilidades destructivas que han provocado el fracaso de la microexplosión.

Las mismas simulaciones numéricas, aplicadas a las microesferas utilizables para reactores de potencia, predicen que harían falta haces confinantes con una energía por pulso al menos del orden de los 3 a 5 MJ para obtener multiplicaciones de energía del orden de 100 con masas de combustible fusionable del orden de los 2 mg. La extrapolación de las verificaciones experimentales permite hasta cierto punto asegurar que estas predicciones son reales, siempre que se cumplan como requisitos básicos la uniformidad en la iluminación de la microesfera y, en términos generales, la no existencia de inestabilidades hidrodinámicas y asimetrías que puedan producir la destrucción de la misma durante la fase de compresión.

REACTORES DE FUSION POR CONFINAMIENTO INERCIAL

El diseño global de los futuribles reactores de FCI ha sido analizado desde prácticamente todos los puntos de vista relevantes. La arquitectura del sistema generador de los haces de confinamiento, los sistemas de transmisión de estos haces, los aparatos de enfoque, las cámaras de reacción, los sistemas de inyección de las microesferas y de alineamiento de los haces y los sistemas de conversión de energía han sido estudiados para las diferentes alternativas mencionadas en los párrafos anteriores, es decir, láseres de diversa longitud de onda, iones ligeros e iones pesados. Gracias al conocimiento de las propiedades físicas básicas, al desarrollo tecnológico desarrollado hasta la fecha y a las predicciones de algunos cálculos teóricos se han podido completar varios diseños conceptuales totales de diversos tipos de reactores. Estos diseños han mostrado que los reactores de FCI son factibles si se logran realizar algunas extrapolaciones del estado actual del desarrollo de las diversas áreas involucradas. Todos estos diseños han sido realizados bajo cuatro criterios orientativos fundamentales: seguridad intrínseca, bajo impacto ambiental, rentabilidad económica y factibilidad técnica.

La **seguridad intrínseca** no sólo incluye los aspectos radiológicos y nucleares, sino también los químicos, dado que se ha de prevenir todo accidente con emisión energética importante, especialmente si puede conllevar emisión de productos radiactivos. La máxima potencia alcanzable en el caso de la FCI está acotada por la propia energía total de los haces confinantes y la masa máxima de deuterio-tritio por microesfera. Por otra parte, el uso de isótopos de hidrógeno en cantidades considerablemente bajas no supone un potencial químico de combustión explosiva importante. Así pues, en ausencia de altos inventarios radiactivos, que prácticamente se restringen al tritio empleado como combustible, y en ausencia de explosiones accidentales de importancia, se puede concluir que los reactores de FCI son intrínsecamente seguros.

De cara a la prevención de la salud de los profesionales de las instalaciones, el capítulo de blindaje puede tener considerable importancia por los materiales sólidos de activación que pueden producirse durante el funcionamiento de la planta. Sin duda alguna, el problema del blindaje puede plantear complicaciones puntuales específicas de operaciones de mantenimiento, pero, sin embargo, los análisis exhaustivos de la activación de los materiales de la cámara de reacción y anejos demuestran que con las técnicas actuales de mantenimiento y control remoto se pueden realizar la totalidad de las operaciones necesarias para el mantenimiento de la instalación sin poner en riesgo indebido la salud de los profesionales de la instalación. El planteamiento que se tiene en este tema es el de desarrollar a tiempo materiales realmente de baja activación, tanto para cumplir los aspectos de mantenimiento como los de disposición final. Los EUA, Japón y la CE tienen programas muy ambiciosos y costosos en esta investigación.

El tritio merece lógicamente una consideración específica por ser, sin duda alguna, la mayor fuente de radiactividad y de problemas radiológicos en el período de funcionamiento que se anticipan en este tipo de reactores. Aunque algunos diseños de reactores de confinamiento magnético identifican más de 5 kg de tritio como inventario continuado en la planta, los estudios de confinamiento inercial han podido encontrar metodologías de alimentación y recuperación del combustible que reducen este inventario al orden de un kilogramo, lo que significa 10 Mcurios de tritio contenidos en materiales sólidos, tuberías y tanques. En este número se incluye, por supuesto, el tritio que por permeabilidad de los materiales va migrando a través de toda la instalación.

Un escenario concebible de accidente radiológico en este tipo de plantas sería la liberación de la mitad de dicho inventario, lo cual supondría la emisión de unos 5 Mcurios de tritio cuyo impacto radiológico dependerá de la altura del punto de emisión y de las condiciones atmosféricas ambientales. En el caso peor para la vecindad inmediata al emplazamiento de emisión a nivel del suelo con inversión atmosférica, se calcula que la dosis total a un kilómetro aguas abajo en dirección del viento dominante sería menor de 40 rem. En condicones de inestabilidad atmosférica (mayor turbulencia) la dosis total se reduciría a 4 rem. Hay que tener en cuenta que en la mayor parte de las recomendaciones internacionales para preparaciones de emergencia se considera que por debajo de 25 rem no se debe optar por ninguna acción de emergencia drástica, como es el caso de la evacuación. Más aun, teniendo en cuenta que el tritio es un β emisor de muy baja energía, el mero cobijo en una residencia habitual reduciría la dosis antedicha en un factor mil o más, y tan sólo sería problemática la irradiación producida como consecuencia de la inhalación o ingestión de alimentos y bebidas tritiados. En este sentido, cabe recordar que los alimentos y líquidos en general pueden ser fácilmente monitorizados para prevenir altas concentraciones de tritio, por lo cual sería relativamente fácil la planificación de las acciones de vigilancia dedicadas para mitigar los efectos de un accidente de este tipo. Como valor de refencia conviene por otra parte recordar que haría falta una tasa de circulación de tritio de un kilogramo por día y GW eléctrico si se consigue un quemado del tritio en la microesfera de fusión del 33 %.

En cuanto al tritio en condiciones nominales, hay que considerar, lógicamente, la posibilidad de su emisión, bien por vía atmosférica bien por vía líquida, teniendo en cuenta su alta permeabilidad. Teniendo en cuenta la cifra anteriormente mencionada, se han podido estimar las tasas de emisión de tritio en una planta comercial de FCI, llegándose a la conclusión de que pueden cumplirse las reglamentaciones actuales incluso en el interior de los edificios de la planta, donde la concentración de tritio en el aire habrá de ser menor de 5 microcurios/m^3.

El tritio, isótopo emisor β de 12,3 años de período, debe generarse en la propia planta, a partir de las reacciones neutrónicas inducidas en los litios 6 y 7. De ahí que en la cámara de reacción que va a confinar las microexplosiones haya que adecuar en todos los diseños los sistemas de alojamiento de litio, que por un lado pueden servir para extracción de la energía, y al mismo tiempo, para la producción de tritio.

El mencionado sistema de extracción

de energía, lógicamente, debe incluir un refrigerante fluido, que contendrá litio o no en función del sistema y materiales que se adopten. Por ejemplo, la mezcla eutéctica $Pb_{83}Li_{17}$ se considera como un material refrigerante aceptable en general para las cámaras de reacción de los reactores de fusión (tanto magnética como inercial), mientras que otros diseños prefieren que los materiales de litio sean sólidos y estén refrigerados por un gas.

En cuanto a la **rentabilidad económica** y **la factibilidad técnica,** existen dos puntos críticos de cara a la proyección futura y posible comercialización de los reactores de fusión: en primer lugar hay que considerar los sitemas generadores de los haces confinantes, los cuales ya se han comentado con algún detalle y que en todos los diseños conceptuales representan el componente de más alto precio. El segundo gran componente en sí es la cámara de reacción y particularmente su primera pared, que sufrirá el más alto daño por irradiación debido a los productos de microexplosión tales como rayos X, iones ultrarrápidos y neutrones. Asimismo, se habrá de tener en cuenta la reacción mecánica e hidrodinámica de esa primera pared, y en general de toda la cámara de reacción en función de las condiciones en las cuales se produzca la deposición de energía desde los productos de la microexplosión al material circundante. En este contexto es importante prevenir la generación de ondas de choque que podrían desarrollarse en el interior de la cavidad si ésta está rellenada de gas a suficiente densidad. En general se prefiere cámaras de muy alto vacío en las cuales la primera pared quede protegida de los productos de alta densidad de deposición lineal de energía mediante una cobertura de litio líquido o material similar, que se evapore como consecuencia de la deposición de energía en cada microexplosión, pero vuelva a restituirse al cabo de unas décimas de segundo.

Otra de las parcelas problemáticas en los diseños conceptuales es la identificación y diseño de un sistema de protección para los aparatos de enfoque de los haces confinantes sobre la micropastilla. Estos aparatos de enfoque son generalmente muy sensibles a los efectos de la irradiación, y no hay tiempo para proporcionar una protección extra en el lapso que va desde que los haces confinantes han sido lanzados hacia la microesfera y el momento de llegada de los productos de la microexplosión a los antedichos aparatos de enfoque. En algunos casos se opta por la reposición de los aparatos de enfoque mediante mantenimiento por control remoto, teniendo en cuenta que la modularidad de la planta permite la indisponibilidad de una de las cámaras sin merma apreciable de la potencia total de la instalación. Esta modularidad se ha reducido a unas cuatro o cinco cámaras por central en algunos diseños, pero, sin embargo, en otros se opta precisamente por ir a un número elevado de cámaras de reacción (igual o mayor a 20), alimentadas todas ellas por el mismo sistema de generación de haces confinantes que se deflectan a una u otra cavidad en función del turno correspondiente. La posibilidad de modularizar hasta este extremo los reactores de FCI es un aspecto positivo que se ha puesto de manifiesto en casi todos los diseños conceptuales, por las ventajas de cara al mantenimiento, así como por la reducción del coste de instalación por no aparecer grandes equipos sometidos a altas presiones, sino por contar con equipos de tamaño relativamente reducidos.

Por supuesto, estos diseños conceptuales no son en punto alguno referencias definitivas de lo que pueda ser un reactor de fusión, pero sí han servido para identificar los problemas pendientes en este desarrollo, así como para establecer un escenario claro de hacia donde tiene que tender la investigación de FCI para su más rápida comercialización.

CONCLUSIONES

Podría decirse que la primera conclusión sobre la historia y las perspectivas sobre la FCI es un cierto optimismo, en tanto que programas con menos de quince años de antigüedad han dado ya resultados satisfactorios y han producido neutrones de fusión, lo que no ha sido alcanzable por otros medios. Hay que poner énfasis en que el soporte financiero y presupuestario de estos programas ha sido considerablemente reducido, y que en algunos casos la colaboración internacional ha sido relativamente constreñida, lo cual ha dificultado aún más el desarrollo de estas investigaciones, de por sí naturalmente complejas. A pesar de ello, es razonable afirmar que la FCI se plantea ya hoy día como una opción sólida para la explotación de la fusión nuclear. Hay que admitir, no obstante, que en muchas de las magnitudes características de los sistemas generadores de haces confinantes se debe aumentar el valor actualmente alcanzable en dos órdenes de magnitud, lo que puede parecer un gran esfuerzo de desarrollo, pero hay que hacer notar que en estos últimos quince años esas mismas magnitudes se han multiplicado por tres e incluso por cuatro órdenes de magnitud. Otro punto crítico en general es el de la obtención de materiales de características idóneas para cumplir las diversas funciones encomendadas, teniéndose en cuenta el problema agudísimo, ya expuesto anteriormente, de la fuerte irradiación neutrónica e iónica que van a sufrir los materiales de la cámara de reacción, algunos de los cuales son relativamente sensibles por la función muy precisa que tienen que desarrollar.

En cuanto a las microesferas de fusión en sí, hoy día se dispone ya de la tecnología para fabricar las más diversas familias que se han mencionado, desde las utilizadas para experimentación inmediata hasta las identificadas en los análisis teóricos como más adecuadas para los futuros reactores de fusión.

Es ocioso decir que el desarrollo de la FCI puede beneficiarse de otras líneas de investigación como, por ejemplo, la superconductividad a alta temperatura, que puede reducir los costes de los grandes aceleradores y abrir nuevas vías para la investigación de fusión confinada por iones pesados, así como de láseres de electrones libres y otras alternativas.

Por supuesto, el resultado final de estas investigaciones dependerá en gran medida del esfuerzo presupuestario y en horas-hombre que se dedique a ello. En tal sentido es importante señalar la decisión del Departamento de Estado norteamericano de lanzar su programa Laboratory Microfusion Facility, que en los próximos cuatro años tendrá que decidir sobre qué sistema generador de haces confinantes se vuelca mayoritariamente la investigación, de tal manera que hacia 1998 haya podido quedar completada una instalación con un coste total de 1.000 millones de dólares, que pueda proporcionar microexplosiones con multiplicaciones energéticas de 100 o superiores, que representen en total alrededor de 1.000 MJ de energía por microexplosión, habiendo sido inducidas por haces que tengan entre 1 y 10 MJ de energía por pulso. En este momento el Departamento de Energía auspicia fundamentalmente cuatro candidatos para tal fin, como son los láseres de vidrio de neodimio, de fluoruro de kripton, aceleradores de iones ligeros y de iones pesados, aunque existe una cierta decantación por el primero de ellos en algunos medios. Asimismo, son importantes en este sentido las iniciativas llevadas a cabo en la URSS, Japón y Europa.

Por otra parte, la colaboración internacional, fundamental hoy día para el avance de los conocimientos, se ha acelerado en este campo, como se testimonia por el hecho de que el pasado mes de octubre se constituyera en Madrid, durante la celebración del 19th ECLIM en la E. T. S. de Ingenieros Industriales, la Internacional Society of Inertial Fusion, una piedra más para edificar la tecnología que permitirá explotar la fusión a través del confinamiento inercial.

ACTIVIDADES DE LA SNE

LA JUNTA DIRECTIVA INFORMA

La Junta Directiva de la SNE ha tomado recientemente los siguientes acuerdos:

- Convocar la Asamblea General Ordinaria de la Sociedad correspondiente al ejercicio de 1988 para el día 31 de enero a las 18 h 30' en primera convocatoria y a las 19 h en segunda y última, en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid. Al haberse recibido una única candidatura para la renovación de cargos de la Junta Directiva compuesta por: vicepresidente, Francisco Vighi Arroyo; secretario general, Antonio Caretti Gutiérrez; vocales, Juan Estapé Arnau, José M. Fernández Mesa, Adolfo Martínez Flórez y Luis Ruiz Castillo; estos candidatos serán proclamados electos en la Asamblea.
- Programar una reunión monográfica sobre los resultados de explotación de las centrales nucleares españolas durante 1988 para principios del mes de marzo próximo.
- Aprobar la programación de los próximos números de la REVISTA DE LA SNE: febrero, ingeniería de apoyo a la explotación; marzo, estudios probabilísticos de Seguridad; abril, planes de emergencia, y mayo, Conferencia Internacional sobre Mejoras de Disponibilidad.
- Tomar nota de los ceses, a petición propia, de Angel Domínguez Costa como miembro de la Comisión de Publicaciones, debido a sus actividades profesionales, y de Antonio Díaz Marteache, miembro de la Comisión de Programas, por haber sido promovido profesionalmente a otras áreas de la ingeniería, agradeciendo a ambos su esfuerzo y colaboración en las tareas de sus respectivas comisiones.

JORNADA INTERNACIONAL SOBRE "LA ENERGIA NUCLEAR EN EL FUTURO DE EUROPA"

Organizada por la SNE, el pasado 12 de diciembre tuvo lugar esta Jornada, que se desarrolló en dos sesiones. La primera, presidida por Fernando Alvarez Mir, contó con las intervenciones de José María Martínez-Val, catedrático de Tecnología Nuclear, UPM, y presidente de la SNE, que disertó sobre "Fuentes de energía para la producción de electricidad: potencialidad intrínseca"; Victoriano Reinoso y Reino, presidente del Club Español de la Energía, con el tema "Problemática española del suministro de energía"; Kim Ekberg, Project Manager de Studsvik Nuclear (Suecia), que habló sobre "El caso sueco", y Fabrizio Caccia-Dominioni, director de Energía Nuclear, CEE, que trató "La energía nuclear en la Comunidad Europea: el reto del futuro".

La segunda sesión consistió en una Mesa Redonda, moderada por Adolfo García Rodríguez, ex-presidente de la SNE, que tuvo la participación de Luis del Val, subdirector general de Energía Nuclear; Jesús Faig, de la Secretaría Nuclear de FECSA, y José Luis Torá Galván, director técnico del Grupo ENDESA, a la que se sumaron los ponentes de la primera sesión.

Un momento de la Mesa Redonda. De izquierda a derecha reconocemos a J. Faig, J. L. Torá, F. Caccia-Dominioni, A. García Rodríguez, L. del Val, K. Ekberg, J. M. Martínez-Val y V. Reinoso

PROGRAMA DE INTERCAMBIO DE ESTUDIANTES PARA 1989

Durante los últimos dos años la SNE ha participado en el programa de intercambio de estudiantes promovido por la Sociedad Nuclear Europea, gracias a la cual algunos de nuestros estudiantes han desarrollado en instituciones y empresas extranjeras actividades en el campo nuclear.

Para este año el intercambio está previsto con Inglaterra y consta de tres plazas que se cubrirán entre los estudiantes asociados a la SNE, por lo que se convoca a todos aquellos interesados para que presenten la solicitud por escrito en la que se deberá hacer constar, además, la siguiente información:

- Datos personales.
- Escuela o Facultad en que cursa estudios.
- Asignaturas nucleares cursadas hasta el momento de la solicitud.
- Temas nucleares preferidos.
- Período de estancia que podría cumplir (uno a tres meses, durante el verano).
- Idioma inglés (se efectuará una prueba).
- Otros conocimientos (informática, etc.).

Las solicitudes deberán presentarse antes del 15 de marzo, en la sede de la SNE, dirigidas a:

Sociedad Nuclear Española
Programa de Estudiantes 1989
Pinar, 6 bis - 28006 MADRID

Todos los solicitantes serán informados, antes del 30 de marzo, de la aceptación o denegación de las plazas. Los seleccionados recibirán el billete de ida y vuelta al destino de trabajo, donde se les hará entrega de una cantidad suficiente para alojamiento, manutención y otros gastos mínimos. Al final del período de intercambio, los seleccionados deberán presentar un informe de unas 8 ó 10 páginas, en inglés, resumiendo el trabajo desarrollado.

REUNION MONOGRAFICA

Bajo el título "La operación de las centrales nucleares españolas en 1988, experiencias y perspectivas", tendrá lugar el próximo 1 de marzo una reunión organizada por la Sociedad Nuclear Española, en el Instituto de Ingeniería de España, situado en la calle General Arrando, 38, de Madrid.

La jornada está estructurada en cuatro sesiones:

SESION I. La producción nuclear española en 1988; presentación a cargo de Alfonso Alvarez Miranda, presidente del Fórum Atómico Español.

SESION II. La operación de las centrales nucleares en 1988, que contará con la participación de Juan V. Llinares (jefe CN José Cabrera), Francisco Mier (jefe CN Sta. María de Garoña), Carlos Fernández Palomero (jefe CN Vandellós I), Ignacio Araluce (jefe CN Almaraz), Luis Coll (jefe CN Ascó), Javier López-Aranguren (jefe CN Cofrentes), Alberto Biete (jefe CN Vandellós II) y Víctor Sola (jefe CN Trillo).

SESION III. Mesa Redonda, en la que intervendrán: Eduardo González (vicepresidente del CSN), Víctor Pérez Pita (director general de la Energía del MINER), José M. Jiménez Arana (presidente de ENUSA), Eduardo Díaz Río (gerente CN Trillo), Francisco Vighi (director de TECNATOM), Gonzalo Díez