

Tomás Díaz de la Rubia Director* de Ciencia y Tecnología en el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore



Tomás Díaz de la Rubia, Doctor en Físicas por la Universidad de Nueva York, es Director en funciones de la Dirección de Ciencia y Tecnología del LLNL y se presta amablemente a contestar a nuestras preguntas con las que tratamos de orientar a nuestros lectores sobre el presente y el porvenir de esta tecnología, que supone un notable hito en los trabajos que se vienen desarrollando en el Centro desde hace muchos años.

El *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL), situado en *Livermore* (California) es uno de los principales centros de investigación federales de los Estados Unidos cuya misión es *avanzar y aplicar la ciencia y la tecnología* en:

- *consolidar la seguridad y fiabilidad de la disuasión nuclear americana.*
- *reducir o contrarrestar las amenazas a la seguridad nacional y global.*
- *aumentar la seguridad energética y medioambiental del país.*
- *reforzar su competitividad económica.*

Las actividades investigadoras del centro comprenden las direcciones de *Ciencia & Tecnología*, *Seguridad Global*, *Armamento & Integración Compleja* y *Equipamiento de Ignición (NIF) & Ciencia de Fotones*. Sus instalaciones que abarcan una extensión de una milla cuadrada ocupan a unas 7.000 personas.

Después de varios años de intensos trabajos de investigación, *NIF* anunció el pasado mes de enero haber dado un paso adelante importantísimo en el camino hacia la obtención de una reacción de fusión atómica auto-sostenible y con ganancia energética en confinamiento inercial (ICF). *NIF* dirigió la energía de 192 potentes rayos láser que totalizaban más de un megajulio hacia una pequeña cápsula conteniendo deuterio y situada en el interior de un cilindro hueco. Estos ensayos, publicados en la revista *Science* el pasado mes de Marzo, demostraron que las condiciones necesarias para

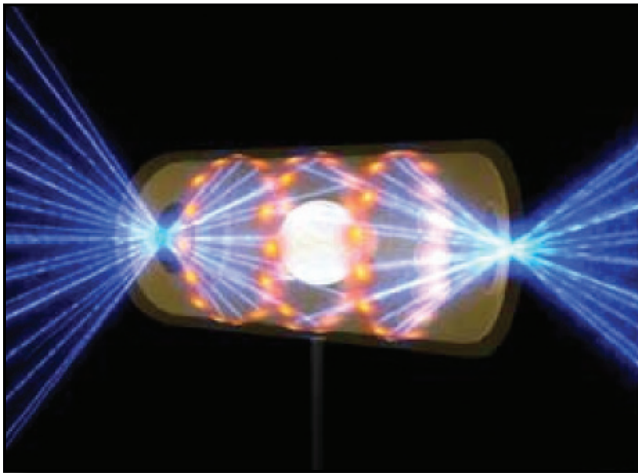
realizar la fusión en laboratorio podrán ser alcanzadas por el *NIF* en los próximos dos años. La reacción de fusión que se producirá entonces entre dos isótopos de hidrógeno, el deuterio y el tritio, similar a la combustión estelar, generará varias veces más energía que la de los láseres utilizados para la ignición.

Este éxito inicial ha abierto la puerta a una serie de perspectivas en diferentes campos de la ciencia, sobre todo a las posibilidades futuras para la producción energética por fusión atómica diferente de la más avanzada actualmente de confinamiento magnético (ITER).

¿Podemos pensar que el éxito de la operación comunicada en enero por el NIF, supone un paso importante hacia una futura producción de energía eléctrica por fusión atómica?

Estos primeros resultados representan un paso importantísimo en el camino hacia la demostración de la fusión por confinamiento inercial en el laboratorio. En los próximos meses intentaremos esta prueba enfocando los 192 láseres del NIF, con energías totales del orden de 1,2 a 1,5 megajulios, a cápsulas criogénicas que contengan deuterio y tritio. Las expectativas en este momento son muy esperanzadoras y tenemos la confianza de que lograremos la ignición de un plasma de fusión nuclear y la ganancia energética. Este será entonces el primer paso hacia la futura producción de energía eléctrica por fusión atómica.

* Director en funciones



Recreación de la ignición con rayos láser de la cápsula con deuterio y tritio en el recinto de confinamiento inercial

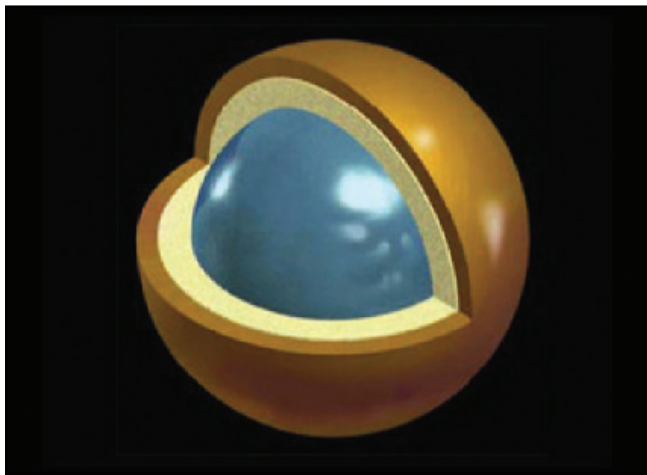


Imagen de la cápsula conteniendo los isótopos de hidrógeno y sus capas protectoras

La energía desarrollada en las operaciones de fusión nuclear se manifiesta a temperaturas elevadísimas. ¿Cuales son los principios utilizados para lo que denominan *confinamiento inercial* a diferencia del *confinamiento magnético* utilizado en los “tokamaks”?

La idea central de la energía de fusión es la de hacer fusionar los núcleos de dos isótopos del hidrógeno, el deuterio y el tritio. Esta reacción ocurre continuamente en el centro del sol, pero su realización en la tierra ha resultado muy difícil y solo se ha conseguido en los ensayos de bombas termonucleares, y en laboratorio a escala todavía ineficiente en el balance energético entre lo que se consume al producirla y lo que se obtiene del número de reacciones logradas. Para llegar a estas condiciones de forma controlada en el laboratorio, es necesario crear y confinar un plasma con estos isótopos. En dicho plasma,

núcleos cargados positivamente de deuterio y tritio pueden llegar a tener colisiones muy energéticas capaces de romper la barrera de repulsión electrostática entre ellos y dar lugar a que se fusionen, creando así un núcleo nuevo de helio y un exceso de neutrones. La masa del núcleo de helio es ligeramente menor que la suma de las masa de los dos isótopos del hidrogeno y esa diferencia se manifiesta como energía cinética según la famosa ecuación de Einstein, $E=mc^2$. Esta energía cinética se convierte en calor cuando el núcleo de helio (partícula alfa) y los neutrones son detenidos por los materiales que forman la cámara de fusión. Tanto la fusión por confinamiento magnético como por confinamiento inercial intentan reproducir estas condiciones de forma controlada para generar energía utilizable en las redes eléctricas.

En la fusión por confinamiento magnético, se utilizan grandes imanes superconductores para contener el plasma de deuterio y tritio de baja densidad pero a temperaturas de 100 a 300 millones de grados Kelvin. Esta contención se logra dirigiendo las partículas cargadas en órbitas cerradas en los campos electromagnéticos generados por los imanes superconductores. El plasma tiene que ser mantenido en un estado de confinamiento durante tiempos muy largos y sin que sufran inestabilidades que den lugar a su enfriamiento. En la fusión por confinamiento inercial, el combustible, al igual que en la fusión magnética, una mezcla al 50% de deuterio y tritio, se comprime hasta presiones del orden de 100.000 millones de atmósferas y densidades equivalentes a 100 veces la del plomo sólido, alcanzando temperaturas de 100 millones de grados Kelvin, es decir condiciones equivalentes al interior del sol. Este confinamiento, que dura varios nanosegundos, da lugar a la ignición de un plasma de fusión entre los átomos de deuterio y tritio en el centro de la cápsula. Este frente de ignición se propaga y quema el combustible de fusión en tan solo centenas de picosegundos, generando cantidades masivas de energía ($E=mc^2$) en forma de neutrones, partículas alfa (núcleos de helio) y rayos X.

El principio de la confinación inercial es sencillo. La energía del haz de láseres se absorbe en un cilindro (normalmente de oro) que la convierte en rayos X. En el centro del cilindro se encuentra una cápsula, que se mantiene cercana a la temperatura del punto triple del hidrógeno⁽¹⁾, y que consiste en una capa muy fina (micras) de plástico dentro de la cual coexisten una capa de deuterio/tritio sólido y dentro los mismos isótopos pero en estado gaseoso. Cuando la capa de plástico absorbe los rayos X, explota. A toda acción hay una reacción igual y opuesta y por lo tanto la capa sólida de deuterio/tritio implosiona comprimiendo a muy elevada velocidad a ella misma y al gas de deuterio/tritio. Este proceso genera una onda de choque que da lugar a que el gas de deuterio/tritio se comprima de tal forma que se inicie la reacción de fusión en el centro de la cápsula. Este proceso de ignición genera un frente de fusión que se

(1) Se denomina punto triple de un elemento o compuesto químico a las condiciones de temperatura y presión en que coexisten las tres fases o estados de la materia, sólido, líquido y gaseoso. En el caso del hidrógeno se encuentra a 13,84°K y 7,04 kPa (1 atmósfera = 101,3 kPa).

FUSIÓN NUCLEAR

En los primeros instantes del Universo la energía del Big-Bang se transformó en la materia de las partículas elementales (quarks y leptones) que se combinan para formar los protones y neutrones, los componentes de los núcleos de los átomos: en esos instantes solo se formaron los núcleos de hidrógeno y helio y enseguida se fijaron los electrones para constituir los átomos. Al mismo tiempo que la materia, aparecen las 4 fuerzas que la gobiernan (gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil)

El Universo está compuesto en casi tres cuartas partes de hidrógeno, otra cuarta parte de helio y apenas un uno por ciento de los otros noventa elementos de la tabla periódica en que está clasificada la materia.

Las estrellas, formadas mediante la aglomeración de átomos por la acción de la gravedad, obtienen su brillo por la combustión del hidrógeno de su interior, que se convierte en helio: cuatro núcleos de hidrógeno (peso atómico 1,008), cuatro protones, hacen uno de helio, dos protones y dos neutrones, peso atómico 4,003. Esta pequeña diferencia de masa se convierte en energía ($E=mc^2$) que se trasmite al exterior venciendo la gravedad. De este modo, mientras exista hidrógeno en el interior la estrella es estable. Cuando el combustible se agota, el horno termonuclear se apaga, la gravedad ejerce su atracción y la estrella se colapsa.

El sol, nuestra estrella, nacida hace unos 4600 millones de años, quema unos 1000 millones de toneladas de hidrógeno por segundo, pero seguirá funcionando otros tantos años antes de que se agote su combustible y se apague.

Este proceso termonuclear natural es el que se intenta reproducir, a escala infinitamente menor, para obtener energía abundante, limpia y prácticamente inagotable.

propaga del centro hacia fuera a una velocidad mas alta que la velocidad de expansión de la cápsula, quemando así el combustible de fusión y generando un exceso de energía que se libera, al igual que en el caso de la fusión por confinamiento magnético en forma de partículas alfa y neutrones de alta energía cinética.

¿Se espera que la operación de fusión por confinamiento inercial (ICF), en su etapa de producción de energía sea semejante en cuanto a su transformación en vapor utilizable, es decir, estable, sencilla, de fácil mantenimiento, etc., a las centrales actuales térmicas o nucleares?

El principio de producción de energía es muy parecido. Los neutrones emitidos en la reacción de fusión serán los que utilicen su energía para elevar la temperatura de un fluido (en el caso de fisión, agua, pero en el caso de fusión una sal líquida que contenga litio). Este fluido será entonces el que genere el vapor utilizable en un clásico y bien conocido en ingeniería, intercambiador de calor con la particularidad de la naturaleza, ya mencionada del líquido en el primario del mismo. La ventaja de la energía de fusión es que ésta no produce residuos de combustible nuclear y no requiere de enriquecimiento del uranio. Además, el combustible de fusión es prácticamente inagotable pues uno de cada 6.500 átomos en el agua es un isótopo de deuterio. Esencialmente, 50 vasos de agua tienen la energía equivalente a dos toneladas de carbón.

El tritio se obtiene a través de reacciones de transmutación nuclear en el litio, un elemento de gran abundancia en la tierra. Los reactores de fusión, al no utilizar masa crítica de uranio o plutonio, tampoco están expuestos a los riesgos de accidente a los que están los reactores de fisión, aunque bien cabe decir que hoy en día la energía de fisión es segurísima.

¿Se deberán crear industrias distintas a las existentes hoy en día, para la fabricación de los materiales y componentes mecánicos, eléctricos o electrónicos de esas centrales, incluido el núcleo en que se realiza la ignición?

No me cabe duda de que la demostración de la fusión inercial en el NIF en estos próximos dos años generará gran interés, no solo a nivel científico sino también a nivel industrial.

Para lograr que esta energía sea económicamente viable en un futuro próximo, será necesario desarrollar tecnologías de materiales para altas temperaturas y resistentes a la radiación, de materiales para láseres de gran eficiencia y también para la producción en masa de las cápsulas en las que se realiza el proceso de ignición del combustible de fusión.

¿Será el tiempo transcurrido, una vez conseguida esta reacción en laboratorio hasta la primera central de demostración, tan breve como lo fue con los reactores y centrales nucleares de fisión?

No creo que sea tan breve, pero lo que se tarde dependerá en gran parte de los niveles de presupuesto que se adjudiquen en EEUU, Europa y en otros países para este desarrollo. Los retos tecnológicos y de ingeniería son muy importantes pero estamos convencidos de que no son imposibles de conquistar.

Es interesante destacar para la fusión por confinamiento inercial, que estas tecnologías se pueden desarrollar en paralelo y que cada una de ellas puede ser probada independientemente de la otra sin necesidad de integrarlas todas en un reactor prototipo hasta el final. Desde el punto de vista tecnológico y de ingeniería ésta es una gran ventaja de la fusión inercial sobre la magnética.

¿Podría sugerirnos un calendario comparativo entre el más probable para la instalación ITER, su posterior DEMO y la primera CENTRAL comercial, con lo que serían las etapas del proceso ICF?

Es difícil hoy en día saber cuáles van a ser estos calendarios. En el NIF, esperamos hacer los primeros experimentos con cápsulas de deuterio/tritio en el 2011 y demostrar la fusión y la ganancia energética en ese mismo año o en el 2012. Los mismos experimentos de ignición del plasma en el ITER no están contemplados hasta el año 2028 en este momento.

Tenemos confianza de que con un programa agresivo de desarrollo tecnológico, el primer prototipo de reactor de fusión por confinamiento inercial que genere electricidad podría ser realizado entre 10 a 15 años después de la prueba de la fusión en el laboratorio, es decir entre el 2022 y el 2025.

¿Se aprovecharán de alguna manera conocimientos adquiridos en los “Tokamak” y en ITER (por ejemplo en materiales) para el proceso ICF?

Hay varias tecnologías que son comunes a los dos métodos y los materiales representan una de ellas. Los neutrones generados por las reacciones de fusión interactúan con las materiales estructurales y de primera pared de la cámara perdiendo así su energía en colisiones con los átomos de estos materiales. Estas colisiones causan daños internos en los materiales, provocando una degradación progresiva de la integridad mecánica de la de la estructura. No solo el efecto de los neutrones es similar; también lo puede ser el de los rayos X (calentamiento y tensión térmica) y parcialmente el de la interacción de partículas cargadas.

Otro campo claro es la robótica y el mantenimiento remoto al igual que los sistemas de planta de potencia que en su conjunto claramente pueden presentar aspectos coincidentes.

Otra tecnología en común es la utilización de sales líquidas como elemento refrigerante y de transmisión del calor. En ambos casos, estas sales deben de contener litio que se utiliza para generar el tritio, pues el tritio es un isótopo del H que no existe en la naturaleza y por tanto a de ser obtenido en el propio sistema de fusión para de esta forma servir de combustible, lo mismo en la cápsula de confinamiento inercial que en el plasma del confinamiento magnético.

¿Existe el peligro, dada la proximidad tecnológica del ICF a las aplicaciones bélicas, de dirigir el desarrollo de estos láseres para usos no deseados?

La tecnología láser se está desarrollando mundialmente para todo tipo de aplicaciones civiles e industriales. Creo que se puede decir, que hoy en día los láseres son parte integral de muchísimas industrias y de la vida moderna. La fusión por confinamiento inercial representa por lo tanto otra aplicación de la tecnología de láser a los avances de la sociedad, en este caso como método para lograr obtener energía limpia e inagotable para satisfacer las necesidades de la humanidad en un futuro no muy lejano.

¿Hay alguna relación científica o de contactos mutuos sobre actividades de fusión de cualquier tipo, del LLNL

con algunos centros españoles? En caso afirmativo, ¿con cuáles?

En Livermore, tenemos una gran relación tanto científica como personal con el Instituto de Fusión Nuclear de la ETSII de la Universidad Politécnica de Madrid. Este Instituto, fundado por el profesor Guillermo Velarde y dirigido hoy en día, por el profesor José Manuel Perlado, lleva décadas en la punta de la investigación de la fusión, especialmente de la fusión inercial. Además, somos grandes amigos y colaboradores del CIEMAT, donde también se realizan estudios importantes de fusión por confinamiento magnético, y donde su exdirector, el gran científico español recientemente fallecido Juan Antonio Rubio fue durante años un gran colaborador y amigo personal.

Muchos estudiantes españoles, sobre todo de la ETSII de Madrid, han realizado su tesis doctoral aquí en el LLNL, trabajando en temas relacionados con los daños producidos por radiación en materiales para la fusión. Esta ha sido y continúa siendo una gran fuente de colaboración científica entre España y EEUU.

¿Sugiere algún tipo de formación específica para los ingenieros industriales españoles, cara a las nuevas tecnologías de producción energética que se desarrollarán en los próximos años?

Creo que para lograr llevar a cabo los avances, que serán necesarios en las próximas décadas en temas de fuentes energéticas limpias y sostenibles, es importantísimo tener una visión amplia de lo que ya hoy en día es un sistema muy complejo. Esto quiere decir que los ingenieros del mañana van a necesitar una visión más amplia de su papel que integre los avances tecnológicos con las realidades socio-políticas y económicas que se presentan. Esto va a requerir una formación que incluya los conocimientos clásicos de la ingeniería (las matemáticas, la mecánica y demás disciplinas clásicas) con las ciencias económicas y sociales.

Por otra parte, yo estoy convencido de que el papel de la simulación de sistemas por ordenadores de gran capacidad (petaflops e incluso exaflops)⁽²⁾ va a tener un impacto grande en el desarrollo de futuras tecnologías energéticas. Sobre todo, este tipo de simulación integrada puede llegar a acelerar el desarrollo e incluso la comercialización de avances en la combustión eficiente de combustibles, en el desarrollo de la fusión y de reactores avanzados de fusión, en el desarrollo de la captura y el secuestro del carbono y en muchos otros temas.

¿Considera de interés la labor de actualización de la formación de ingenieros y científicos que llevan a cabo revistas como DYNA?

Creo que es importantísimo divulgar los avances y las ideas en revistas como DYNA donde se tratan una gran variedad de temas de actualidad, no solamente técnicos sino también de ámbito social y profesional. Revistas como esta juegan por lo tanto, un papel importante en la creación de un ambiente profesional donde los futuros ingenieros industriales de España puedan ver la gran relevancia e importancia social de su profesión y su trabajo.

(2) El flop (Floating Point Operation per Second) es la medida de rendimiento de un ordenador; una persona realizando una división de diez dígitos en 15 minutos, trabaja a unos miliflops, una calculadora de bolsillo simple puede disponer de 10 flops y un ordenador personal unos pocos gigaflops (10⁹ flops). El petaflop supone 10¹⁵ flops y el exaflop 10¹⁸ flops.