

La Fusión Nuclear por confinamiento inercial

J. Manuel Perlado Martín

La fusión nuclear se ofrece en este momento como una alternativa a medio plazo (entendiendo por tal mediados de este siglo XXI) realista y válida para la generación masiva de energía. Además, La fusión nuclear se propone como una opción clara de disponer de una fuente de energía inagotable, limpia y segura. La forma secundaria/final/útil de dicha fuente de energía es la energía eléctrica. La inagotabilidad del combustible necesario (isótopos de hidrógeno) y la gran dispersión geográfica de su fuente (agua del mar), su elevadísima densidad de energía (la más alta entre todas las fuentes conocidas), su seguridad intrínseca, y la baja magnitud de los residuos radiactivos de corta vida generados la sitúan en primer plano dentro de las opciones para resolver el problema de generación de energía a nivel mundial respetando todos los condicionantes ecológicos. Su actual aspecto “negativo/condicionante” es la complejidad de sus sistemas tecnológicos que precisan de una mayor investigación y desarrollo. La fusión nuclear se encuentra en fase de demostración de su viabilidad tecnológica, asumida ya su viabilidad científica. En ese camino queda aún una distancia no corta por recorrer para demostrar los sistemas tecnológicos de una Planta de Potencia. Eso podría situar a las opciones por las que se consigue el calentamiento necesario de la materia para lograr las reacciones de fusión nuclear y el confinamiento suficiente de la misma (magnética e inercial), en una fase de reactor real en los años 2050. La sociedad ha abordado la investigación en fusión nuclear de una manera coordinada, modélica y única internacionalmente como pocos macroproyectos se conocen, y con una gran cantidad de recursos, que se concretan en instalaciones (de miles de millones de euros) como ITER, NIF, LMJ, ya en construcción. Su logro conseguiría resolver la generación de energía eléctrica en un esquema centralizado con distribución en red, lo que no compite sino que se complementa con las alternativas de generación basadas en fuentes de baja densidad de energía pero con capacidad para una localización individualizada más flexible.

Nuclear fusion is currently seen as a realistic, valid alternative in the medium term (understood to be the mid-21st century) for the massive generation of energy. In addition, nuclear fusion is proposed as an option that is clearly based on an inexhaustible, clean, safe energy source. The secondary/final/effective form of this energy source is electric power. The inexhaustibility of the necessary fuel (hydrogen isotopes) and the wide geographic dispersion of its source (seawater), its extremely high energy density (the highest of all known sources), its intrinsic safety, and the low volume of short-lived radioactive waste that it generates all make it the leading option to solve the worldwide problem of energy generation in an environmentally friendly way. Its current “negative/conditioning” factor is the complexity of its technological systems, which require more research and development.

Nuclear fusion is currently in a phase in which its technological viability is being demonstrated, as its scientific viability has already been confirmed. There is still a long way to go on the road to demonstrating the technological systems of a power plant. Consequently, the options for achieving the necessary heating of the matter used to trigger the nuclear fusion reactions and for proper confinement thereof (magnetic or inertial) could be ready for a real reactor phase in the decade of the 2050s. Society has conducted the international research in nuclear fusion in a coordinated, exemplary, unique way that few macro-projects have managed to achieve, and with a large amount of resources that have been used in facilities (worth thousands of millions of euros) such as ITER, NIF and LMJ, which is already under construction. Its success would resolve the issue of electric energy generation in a centralized scheme with network distribution. This would not compete with, but rather would complement the generation alternatives based on low density energy sources, but with a capacity for more flexible, individualized localization.

PRINCIPIOS FÍSICOS BÁSICOS DE LA FUSIÓN NUCLEAR

Cuando dos núcleos ligeros, del hidrógeno al hierro en el sistema periódico, colisionan entre sí, de modo que “entren en contacto” (cuánticamente esto significa estar separados menos de unos 10^{-13} cm), las fuerzas nucleares que actúan entre ellos son lo suficientemente intensas como para compensar las de repulsión coulombiana debidas a sus cargas eléctricas positivas, pudiéndose producir la llamada fusión nuclear.

Esa aproximación necesaria de los núcleos se puede conseguir aumentando

significativamente su energía cinética (**calentamiento** de la materia), lo que da lugar a lo que es la **fusión termonuclear**, ó mediante algún otro mecanismo que nos ofrezca la física, como por ejemplo conseguir la sustitución del (de los) electrón cortical en el átomo (hidrógeno) por una partícula de mucha mayor masa como el muón (206,7 veces más) que orbita entonces mucho más cerca del núcleo, permitiendo a los mismos aproximarse lo suficiente como para que actúen las fuerzas nucleares de corto alcance (*fusión a temperatura ambiente catalizada por muones*). En este texto, y en toda la bibliografía que habitualmente mencio-

na el término *fusión nuclear* siempre se habla de la **fusión termonuclear**, única opción que nos aproxima a una realización práctica en estos momentos (ver Figura 1 que muestra la reacción que se usará en los primeros reactores posibles y su justificación por la mayor probabilidad de producirse a una temperatura dada; se volverá a usar esta figura posteriormente).

Naturalmente la materia a las energías cinéticas (*temperaturas*) que se precisan en ese calentamiento no se comporta como un sólido, ni un líquido, ni siquiera un gas, sino como un “fluido gaseoso”, en el que los electrones han sido “arrancados” de sus órbitas y se mueven libres

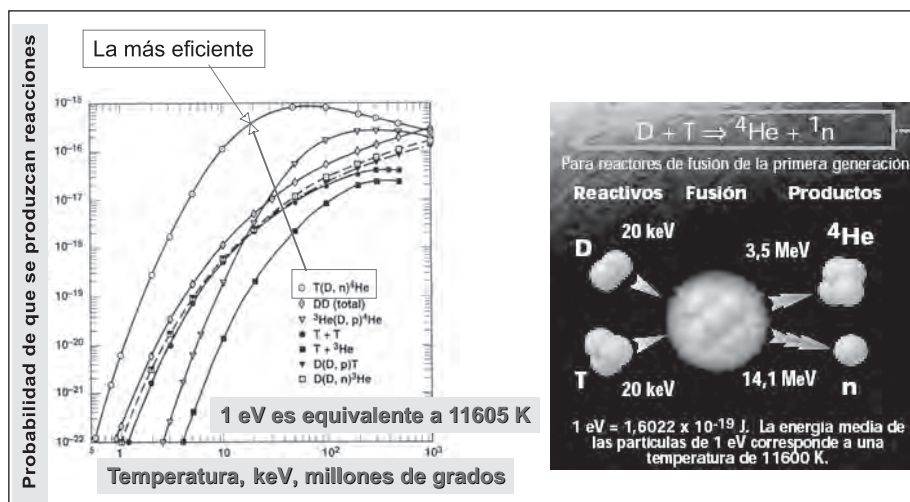


Figura 1.- Mecanismo de Fusión Nuclear de la reacción más probable DT.

junto a un conjunto de iones (denominación dada a los átomos originales sin esos electrones, y por lo tanto cargados positivamente), que se denomina *plasma*. Conocemos que un "gas constituido por partículas cargadas" como el descrito tiende a expandirse naturalmente en su entorno; de manera que para que las reacciones de fusión nuclear tengan lugar en el número suficiente para generar la energía que se necesita, es preciso confinar dicho plasma el tiempo suficiente. La distinta forma de lograr combinar esos dos términos (*calentar y confinar*) da lugar a las dos opciones hoy en día planteadas de manera realista. Mientras que en el caso del confinamiento magnético la densidad de la materia es baja (vacío industrial) y el tiempo de confinamiento es prolongado, en el confinamiento inercial la densidad es muy elevada (hasta miles de veces la densidad nominal de la materia sólida) mientras que el tiempo de confinamiento es muy reducido (inferior a los nanosegundos), ver Figura 2, siempre cumpliendo un criterio mínimo para que el proceso sea rentable en cuanto a la generación de energía (como se va a cuantificar posteriormente) tal que el producto de ambos factores sea superior a un valor dado (criterio de Lawson, que en el caso de reacciones de fusión de deuterio y tritio a una temperatura equivalente de 10 keV, debe de ser de 10^{14} segundos/cm³).

El resultado que nos interesa aquí de la fusión nuclear es la producción de núcleos y partículas cuya masa total es entre 0,1 y 1% menor que la de los dos núcleos que se fusionan. Esta pérdida de masa se transforma en energía cinética de los productos de fusión, y ésta es la que es rescatada en el sistema tecnológico del reactor, mediante el calentamiento de un fluido y el ciclo termodinámico necesario. En el caso de la fusión de dos núcleos de hidrógeno se produce una

pérdida de masa del 0,4 %, y como la transformación directa de un gramo de masa en energía (recordar la manida relación entre masa y energía de *Einstein*) produce 1 (gigavatio x día) GWd (24 millones de (kilovatios x hora, kWh) en la fusión de los núcleos comprendidos en un gramo de hidrógeno se producirán 4 MWd (96000 kWh). Esta energía supone unos diez millones de veces la energía obtenida en la combustión de un gramo de carbón. El tremendo potencial de **densidad de energía** de los combustibles de la fusión nuclear se visualiza bien si se tiene en cuenta que para alimentar anualmente a una central termoeléctrica de 1 GW eléctrico, se necesitan 200 trenes de 100 vagones cada uno llenos de carbón, o 10 superpetroleros de fueloil, o un solo vagón de ferrocarril de uranio, pero... **solamente una furgoneta de hidrógeno**. Esto supone la friolera de 3.4×10^{14} julios por cada kilogramo de combustible (deuterio).

Los procesos de fisión y fusión nuclear son radicalmente distintos, pero complementarios en el sistema periódico. Mientras que la fusión nuclear se produce entre los núcleos ligeros, anteriores al hierro, la fisión nuclear se produce en los pesados, posteriores al hierro en el sistema periódico, de modo espontáneo o inducida por partículas (fotones, neutrones, ...). También se diferencian en la contaminación radiactiva que producen. Todos los procesos de fisión nuclear originan intrínsecamente fragmentos altamente radiactivos, mientras que

en los aparatos de fusión nuclear la dosis radiactiva, en el peor de los casos, es miles de veces inferior a la debida a los fragmentos de fisión, para igual energía producida.

FUSIÓN CONFINAMIENTO INERCIAL: PRINCIPIOS FÍSICOS

Esta opción de conseguir la fusión nuclear para generar energía ha estado basada convencionalmente en la consecución de manera simultánea y mediante el mismo proceso físico del calentamiento y confinamiento la materia. En la fusión por confinamiento inercial un **haz de iluminación** (terminología inglesa "driver") que puede ser un láser muy intenso, un haz de iones (pesados ó ligeros) acelerados, ó una fuente intensa de rayos X incide en un **blanco** (terminología inglesa "target") esférico compuesto por el hidrógeno (DT) que actúa de combustible (fusión). El proceso de calentar tiene que ver con el mecanismo de **compresión**, de manera que nos encontramos frente a un "clásico": $P\Delta V < nT$. ¿Quién lo hace?

Un láser ó un haz de iones ó de rayos X que deposita energía; ¿Cómo lo hace?.... Siguiendo el elemental **Efecto Cohete** a través de un simultáneo mecanismo de **ablación** (expansión de la capa exterior) y **aceleración** provocada en el blanco combustible que se encuentra en el interior de dicha cápsula esférica. La compresión de la materia hasta valores elevadísimos provoca el aumento de su temperatura hasta la deseada de fusión; ahora bien este hecho tiene el inconveniente de que la materia en esas condiciones se mantiene confinada tan solo el tiempo *inercial* que pasa cuando una onda de sonido se mueve desde el interior al exterior de esa materia; y eso supone algunos cientos de picosegundos (10^{-12} segundos). En ese tiempo el número de reacciones de fusión (energía) debe de ser lo suficientemente

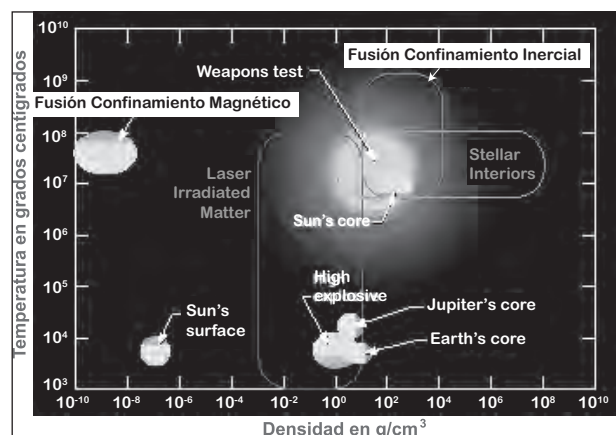


Figura 2.- Rango de densidad y temperatura en el que se desarrollan las opciones de generar energía por fusión nuclear (magnética e inercial)

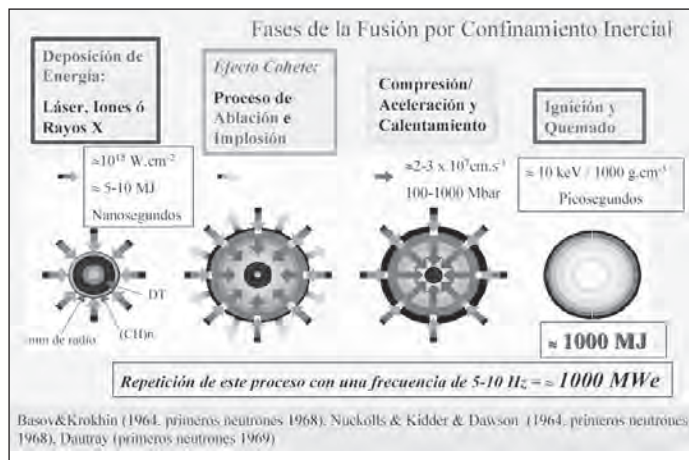


Figura 3.- Fusión por confinamiento inercial

elevado como para compensar la energía invertida en el proceso. Como se ve en el esquema de la Figura 3, cuando la luz de un láser, un haz de iones (hoy en día contemplados solo los pesados) ó un campo de radiación X, de una densidad de potencia de unos 10^{14} - $10^{15} \text{ W.cm}^{-2}$ incide uniformemente sobre la superficie de una microbola de deuterio y tritio que tiene solo un diámetro de milímetros y contiene una masa combustible de miligramos, en un tiempo de decenas de nanosegundos (10^{-9} segundos), se produce la ablación (expansión externa) de su superficie, generándose una onda de presión que se propaga hacia el interior/centro, alcanzando presiones de gigabares ($\sim 10^9 \text{ kg/cm}^2$), con velocidades de movimiento de la materia de $3 \times 10^7 \text{ cm/s}$, la cual comprime y calienta la microbola a cien millones de grados (10^8 K). Si este proceso es efectivo, usando una energía de iluminación de unos 5 MJ se puede obtener una ganancia de energía de 100-200, lo que supone una energía por cada proceso de 1000 MJ. Si se provocan unas cinco microexplosiones por segundo, se puede obtener una central termoeléctrica de fusión nuclear por confinamiento inercial de 1.000 MW eléctricos. En la FCI se obtienen condiciones nunca alcanzadas en nuestro sistema solar (ver Figura 2), presiones de miles de millones de atmósferas, densidades de potencia de 10 exavattios por metro cuadrado, temperaturas de 100 millones de grados, etc., las cuales sólo pueden obtenerse en los procesos finales de la vida de una estrella. Aparte de las inestabilidades hidrodinámicas que se producen en la implosión, para que la onda de presión sea esférica, es necesario que la luz del láser (u otra fuente de iluminación) llegue uniformemente sobre la superficie de la microbola, por lo que el haz del láser original, debidamente amplificado a través de una larga cadena de sistemas debe finalmente llegar al blanco esférico en un número

Central, explicando este término que los fenómenos físicos generan simultáneamente la compresión hasta esas fabulosas densidades procurando el calentamiento isentrópico de una pequeña masa central de la microbola comprimida donde se inician los procesos de fusión nuclear, propagándose hacia el exterior una onda térmica que va situando la materia más fría pero muy densa de las capas adyacentes en las condiciones de temperatura necesarias para la fusión nuclear.

Esta uniformidad en la iluminación puede evitarse empleando lo que se denominan blancos indirectos (*hohlraum*) (ver Figura 4). Los blancos indirectos precisan para su iluminación de un número muy limitado de haces, de manera que se formen grupos de los mismos que penetren en el interior de una cavidad hueca de material de alto número atómico a través de los agujeros existentes en ambos extremos de la misma y en cuyo interior y centro hay una microbola de deuterio-tritio. Los fotones absorbidos por dicho material calientan el mismo hasta valores de los cientos de electronvoltios provocando la emisión de rayos X de baja energía (blandos) que, *ahora sí*, inciden uniformemente sobre la superficie de la microbola siguiendo la ley de uniformidad de la emisión de un cuerpo negro conocida desde los tiempos de Planck. Análogamente, puede realizarse con dos haces de iones, Figura 4. Naturalmente este proceso tiene sentido si el rendimiento de la conversión de los fotones del láser en rayos X es lo suficientemente elevado, lo que está demostrado experimentalmente alcanzando valores del 50 al 80%. Ya se ha mencionado que la energía del pulso láser en los futuros reactores de FCI productores de energía eléctrica, debe ser de 3 a 5 MJ; éste es un dato fiable, estando en la actualidad el valor de la construcción de estos dispositivos en 1.8 MJ como NIF y LMJ. Una manera de rebajar este requerimiento

elevado de haces, tal como se verá al describir las instalaciones ya en construcción como NIF y LMJ. El esquema original hasta ahora explicado, en el que la compresión y calentamiento de la materia se logran mediante esos mecanismos con un solo elemento de iluminación (láser, iones ó Rayos X) se denomina esquema de **Ignición**

es reducir la longitud de onda de la luz láser empleada dado que la probabilidad de absorción de la luz del láser por la microbola es inversamente proporcional al cuadrado de su longitud de onda. De esta suerte parece que es preciso de la tecnología usada originalmente en los láseres de potencia (Nd:cristal con longitud de onda de 1,06 micras (μm) y pasar a emplear láseres de menor longitud de onda, preferentemente en el rango de la luz azul ($\sim 0,3 \mu\text{m}$). Para ello se emplean los multiplicadores de frecuencia consistentes en cristales de KDP (fosfato de potasio di-hidrogenado). Cuando dos fotones de un láser de Nd de longitud de onda de $1,05 \mu\text{m}$ atraviesan un cristal de KDP se obtiene un fotón de $0,527 \mu\text{m}$; y cuando este fotón en unión de otro de $1,05 \mu\text{m}$ atraviesan un segundo cristal de KDP se obtiene un único fotón de $0,351 \mu\text{m}$; es decir, tres fotones de $1,05 \mu\text{m}$ dan lugar a uno de $0,35 \mu\text{m}$, con un rendimiento de un 60%.

El segundo procedimiento es el de la **Ignición Rápida**, Figura 5, que supone conseguir de manera desacoplada el efecto de la compresión del blanco del calentamiento de una pequeña zona central del mismo, tal y como se ha justificado en las Secciones anteriores. La idea original proviene de Tabak y colaboradores en el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore en EE.UU, y ha cobrado en los últimos años una importancia creciente con un gran número de pequeños experimentos demostradores de la idea que hoy en día han pasado a ser instalaciones de demostración ya en construcción ó en fase de diseño (ver posteriormente desarrollo de tecnologías). La idea consiste en provocar de manera "convencional" la compresión de la esfera combustible hasta los valores requeridos (*era lo más barato*), para que en la última fase se ilumine un cono (ó la capa más externa del propio blanco u otras opciones aún por concretar) con láseres de femtosegundos de muy alta intensidad $10^{16} \text{ W.cm}^{-2}$ (hoy en día disponible) de manera que la interacción de la radiación de tal alta intensidad consiga provocar electrones supratérmicos que abren un canal en el plasma exterior a través del cual se ilumina el centro de la esfera con otro láser ultrarápido como los mencionados. La misma idea ha sido también propuesta para conseguir este efecto con iones como medio compresor y de generación del canal de iluminación central y final. El efecto ha sido demostrado experimentalmente por un equipo conjunto del *Institute of Laser Engineering* (Japón) y el *Rutherford Appleton Laboratory* (Reino Unido) usando una combinación del láser de potencia GEKKO-XII con un haz

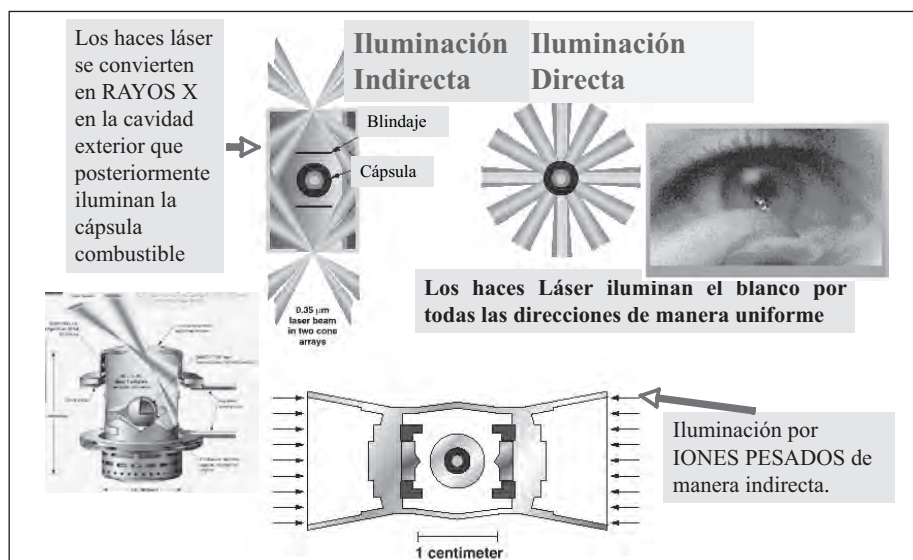


Figura 4.- Esquemas de la Fusión Inercial de Iluminación directa e indirecta

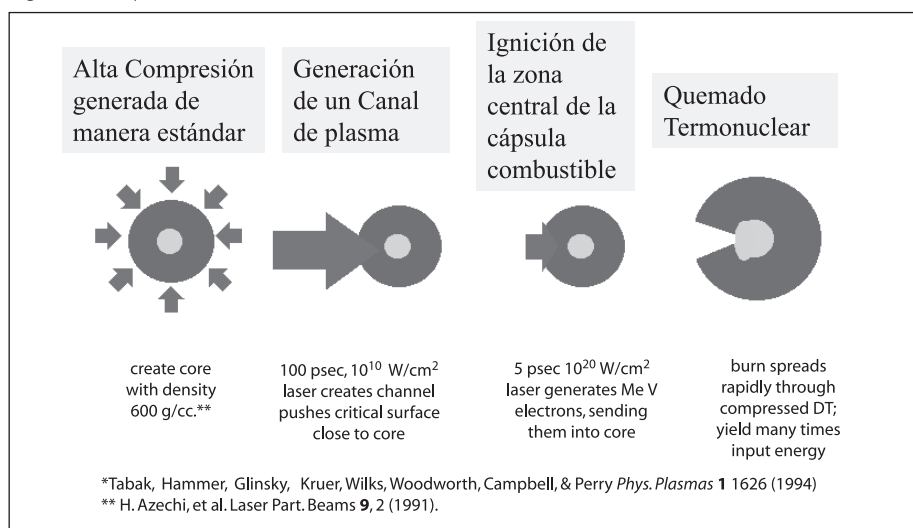


Figura 5.- Esquema de funcionamiento de la Ignición rápida

Láser de Nd Cristal con Energía de 1.8 MJ en 3w ($\approx 0.35 \mu\text{m}$) con 192 haces y que dará una ganancia energética de 30 como máximo [E por fusión/E de iluminación del blanco por el láser]



Figura 6.- Construcción del NIF en el Lawrence Livermore (EE.UU)

de gran intensidad especialmente construido para este experimento. Experimentos similares se están realizando en LLNL ó en L'Ecole Polytechnique en el Laboratoire pour l'utilisation de Laser Intense (LULI) en Francia y se describirán a continuación.

ESTADO ACTUAL DE LAS INSTALACIONES DE FUSIÓN NUCLEAR POR CONFINAMIENTO INERCIAL

En estos momentos de la Investigación y Desarrollo de la Fusión Nuclear como fuente de Energía, el estado de su tecnología es, en buena medida, el de un área de conocimiento que precisa aún de elementos básicos para su implantación efectiva.

Bien es cierto que, sin embargo, **las líneas fundamentales en las que estará asentada esa tecnología están ya establecidas de manera firme**. La descripción crítica de los elementos que configuran los sistemas, próximos y futuros, para generar energía mediante la fusión nuclear es lo que se desea transmitir ahora junto a sus líneas de investigación y desarrollo a largo plazo.

Bueno será recordar que, como ya se ha descrito, nos encontramos frente a dos opciones para la realización comercial de la fusión termonuclear (*magnética e inercial*) cada una de las cuales dicta su propia tecnología, aún reconociendo en su desarrollo diversos componentes comunes.

Si nos situamos en el "aquí y ahora", las siglas clave son: NIF (EE.UU) (Figura 6) y LMJ (Francia) (confinamiento inercial), las cuales determinan los sistemas que ya se han decidido construir y que se están construyendo. Las Instalaciones NIF y LMJ no se contempla nada más que la demostración científica de la ganancia energética, y en una pequeña fracción la comprobación de parte de la física fundamental que justificaría la elección de algunos de los componentes tecnológicos previstos para una futura Planta de Potencia.

Es por lo tanto imprescindible que otros experimentos de menor escala deban demostrar los principios físicos de otros (*los muchos*) componentes tecnológicos que compondrán el dispositivo de generación de potencia, así como otras opciones de confinamiento "no tan en el mercado" como el uso de láseres mucho más eficientes, la combinación de láseres de alta potencia con los de alta intensidad (en lo que se ha dado en llamar "Ignición Rápida") ó el uso de dispositivos *Z-pinch* que generen intensos campos de radiación (en el caso de la inercial).

Proyectos en Construcción ó decidida su construcción
National Ignition Facility (NIF) y Laser MegaJoule (LMJ)

La respuesta a este nivel en la fusión inercial la dan la *National Ignition Facility*

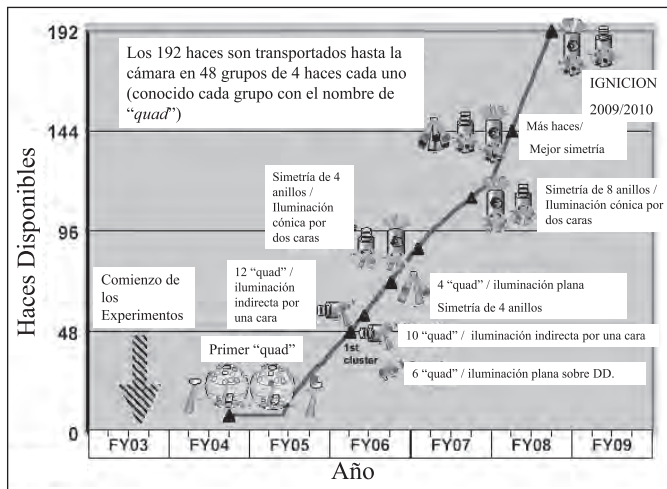


Figura 7. Secuencia temporal de construcción y funcionamiento del NIF [Ignición es ganancia de energía 10-30]. Similar pero con dos años posteriores es el de LMJ.

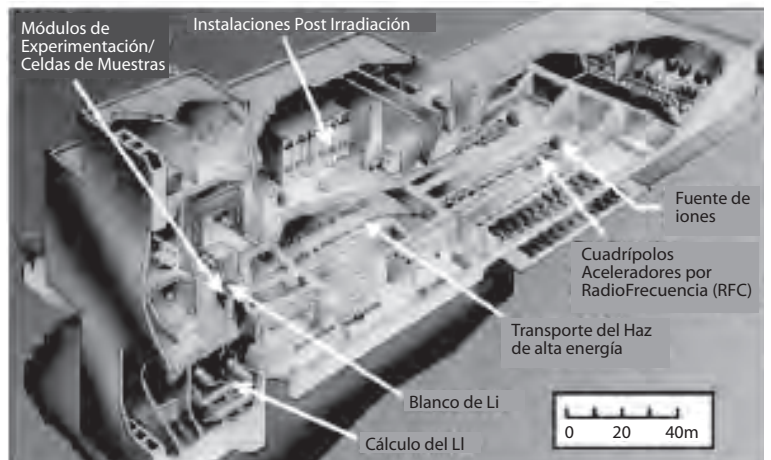


Figura 8. Esquema de Diseño de la International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF) elemento central del Programa de Acompañamiento de ITER para llegar a un Reactor DEMO con la comprobación de materiales bajo irradiación de neutrones

(NIF, en LLNL, EE.UU.) y *Laser MegaJoule* (LMJ, en CESTA/CEA Burdeos, Francia). Ambas tienen como propósito conseguir demostrar experimentalmente la Ignición del Combustible (DT) e incluso una pequeña ganancia energética en la instalación (10-30), entendida como la relación entre la energía generada por fusión en blancos de iluminación indirecta y directa y la energía depositada en dicho blanco. Obsérvese en estas últimas cursivas donde no se menciona la energía total consumida en el parque eléctrico para hacer funcionar el láser. Esto es así porque los láseres que ya se construyen en ambas instalaciones, y parte de los cuales (algún haz) ya está operativa, responden a un concepto muy evolucionado de los "clásicos" de Nd cristal con grandiosas agrupaciones de excitación por lámparas, para poder dar la energía tan elevada que se les solicita (≈ 2 MJ) en tiempos de nanosegundos. De manera que ya sabemos por lo anterior que su eficiencia y repetición es baja. Pero es que el objetivo no es el toda la tecnología de la planta sino la demostración, en pulso de iluminación simple y no repetitivo, que es cierto que se puede obtener del blanco más energía que la que se deposita en él. En la investigación de fusión inercial se mantiene abierta por otro lado el área de desarrollo de la iluminación eficiente (como se ha demostrado) y el de la tecnología de la cámara. Los datos más fundamentales del NIF son la ganancia energética de 10-30 usando un número total de haces de 192 y la energía total liberada por el láser en el blanco de 1.8 MJ, y se investigarán ambas opciones de iluminación directa e indirecta (ver cápsulas en Figura 4). En el caso del LMJ francés el número total de haces será de 240 siendo la energía total liberada aproximadamente la misma. En el caso del experimento francés, la aproximación al sistema final ha sido algo distinta puesto que el CEA ha deci-

dido construir primero, en un espacio y cámara aparte, un solo haz prototipo con las mismas características que los del dispositivo final conocido con el nombre de *Ligne d'Integration Laser* (LIL). LIL está ya operativo con una energía en el tercer armónico del Nd cristal ($0.35 \mu\text{m}$) de 60 kJ. NIF se aproxima de una manera más integral dentro del mismo espacio físico que será la cámara del dispositivo, pero tendrá (tal y como están planteados en la actualidad ambos proyectos) la ventaja de disponer de una flexibilidad tal en la disposición de los 192 haces que le permitirá la realización de experimentos muy uniformes (iluminación directa) ó solo por dos conos opuestos (iluminación indirecta). Esta característica no está contemplada en este momento en LMJ. El esquema de construcción y funcionamiento está representado en la Figura 7.

Actividades de Investigación y Desarrollo en Tecnología de Fusión $\Rightarrow$ Hacia la Comercialización.

Un elemento fundamental discutido desde hace ya muchos años en el ámbito de la fusión y que supone un paso crítico en el programa de investigación tecnológica, y desde el punto de vista de inversión futura y quizás paralela a ITER, es el desarrollo de una Instalación de Irradiación de Materiales al nivel en el que la misma se va a dar en los Reactores de Fusión. Es decir, gran dosis de daño y muy alta irradiación total. Esta instalación no existe, ni una aproximación a la misma, en la actualidad y es imprescindible para el desarrollo y vali-

dación experimental de esos materiales nuevos que aparecen en esta tecnología. De entre diversas opciones iniciales (espalación, Z-pinch, tokamaks esféricos...) en estos momentos la comunidad internacional apuesta por la idea de una fuente basada en reacciones nucleares de "stripping", conocido como *International Fusion Materials Irradiation Facility*, IFMIF, Figura 8, usando D^+ de 40 MeV (generados en dos aceleradores lineales de 125 mA cada uno) como proyectil sobre un blanco líquido de Li que fluye con una velocidad de 15 m/s, flujo de 130 l/s, siendo el área de impacto de 5 cm x 20 cm y debiendo extraerse una potencia de 10 MW con una temperatura de entrada de 250 °C. El sistema dispone, según diseño, de un volumen de irradiación (donde se colocarán muestras) de 0.5 l con una tasa de 20-55 dpa/año a plena Potencia, otra de 6 l con una tasa de 1-20 dpa/año, y una muy grande > 100 l con una tasa de < 1 dpa/año. En todo caso los sistemas de control permitirán controlar la temperatura en el rango correcto entre 250 – 1000 °C. Compárese con lo previsto en un reactor y mencionado anteriormente. **Fusión por Confinamiento Inercial**

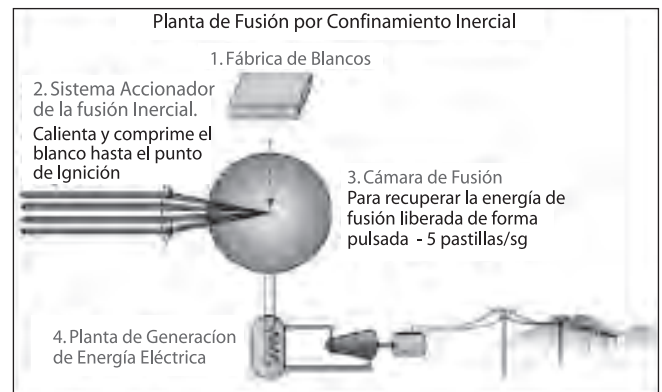


Figura 9. Sistemas componentes de una Planta de Potencia de Fusión por Confinamiento Inercial

La planta de generación de energía por este método se compone en esencia por cuatro partes bien diferenciadas (Figura 9):

i) Haz de iluminación; ii) Factoría para producir los blancos combustibles; iii) Cámara de reacción donde ocurren las reacciones de fusión y se extrae en un primer ciclo la energía, y iv) Conjunto (más convencional) de sistemas de refrigeración/intercambio de calor/ turbina y generación de electricidad.

Mencionemos los logros que hay que alcanzar para justificar esta opción desde el punto de vista de generación de energía.

Se deben conseguir densidades en un blanco de milímetros de 600 - 1000 g.cm⁻³ para lo que se necesita una energía depositada en el blanco de $\approx 5-10$ MJ. Se obtendrá una ganancia de ≈ 100 lo que representa una energía de ≈ 1000 MJ. Si conseguimos repetir dicho proceso con una frecuencia de 5 - 10 Hz, se obtendría una Planta de Potencia de ≈ 1000 MWe. La física ya estudiada de la implosión indica una duración de pulso del haz iluminación de ≈ 10 ns con una potencia en el haz emisor de ≈ 1000 TW y una Intensidad en el blanco de $\approx 10^{14}$ - 10^{15} W.cm⁻².

Para que la energía generada sea aún más “rentable” el haz de iluminación (láser ó haz de iones) podría operar sobre diversas cámaras de reacción a la vez simplemente cambiando la dirección de su “puntería” cada vez hacia una de las cámaras. Básicamente la eficiencia energética del sistema a escala comercial va a requerir de:

- Blancos de alta ganancia con energía generada por fusión del orden de 50 a 1000 veces mayor que aquella que le da el haz de iluminación. En este aspecto queda un reto formidable en la fabricación de dichos blancos, en el diseño, la tecnología de fabricación y el desarrollo de materiales que los hagan más eficaces, ver la Figura 10.

- Sistema de Iluminación eficiente con rendimientos en el rango del 10-30 % y tasas de repetición de 5-10 Hz. Este dispositivo (aún no existente a la escala de energías necesaria) se está investigando siguiendo la línea de los láseres de excimeros (KrF/0.25 micras)) en el Naval Research Laboratory (ver Figura 11) con los sistemas NIKE y ELECTRA, también en el Rutherford Appleton Laboratory con la construcción de sistema GEMINI. Además existe otra línea de investigación consistente en la iluminación del medio activo (Nd) mediante láseres bombeado por diodos con lo que se consigue una excitación selectiva de la población atómica del medio generando al final el efecto láser de manera más eficiente y con capacidad de repetición; un ejemplo de esto es el láser MERCURY de LLNL (Figura 11) aunque también el Institute Laser Engineering de la Universidad de Osaka está introducido en esta línea de investigación.

- Fabricación de Blancos de bajo coste (se estimaba hasta hace poco de 25 centavos de dólar por cada uno) y con una alta tasa de producción (100 millones por año)

- Cámara de Reacción de Larga Vida Operativa (del orden de las Plantas actuales de 30 años) y por supuesto generadora de muy baja Radiactividad.

Dentro de la línea de la Ignición Rápida todo un cúmulo de instalaciones están aflorando en estos momentos en diversos laboratorios del mundo. Japón está completando la instalación FIREX I (ver Figura 12) y está proponiendo una segunda fase FIREX II. Francia ha aprobado un Proyecto en la Región de Aquitania de 45 Millones de Euros para construir el sistema PETAL (ver Figura 12) que consta de un sistema de 8 haces cada uno de los cuales libera 17 kJ de energía para la compresión de la cápsula combustible en tiempos de nanosegundos 1.053 μ m y 8

kJ a 351nm y un sistema de calentamiento central de 3.5 kJ de energía liberados en 0.5 - 5 ps, lo que supone una potencia de 7 PW. Por otra parte en 2007 se presenta a la Unión Europea una iniciativa liderada por el Rutherford Appleton Laboratory (Reino Unido) al Programa de Grandes Infraestructuras Europeas (ESFRI) junto a un gran significativo grupo de laboratorios y universidades europeos (también con participación internacional) para preparar un diseño en tres años cuya construcción se someterá a decisión al cabo de dicho tiempo; el proyecto se llama HiPER y consiste en un sistema de 44 haces liberando 200 kJ a 0.35 micras en 5 ns para la compresión y un sistema de calentamiento de petavatios de 70 kJ en 1 ó 3w en 10 ps todo en una cámara del tamaño de la del NIF, donde se pueda demostrar la factibilidad y ganancia del sistema. En EE.UU. (Figura 12) también se están ya construyendo instalaciones en esta línea en el Laboratory Laser Energetics de la Universidad de Rochester (OMEGA-EP) y en el Laboratorio Nacional Lawrence Livermore sobre la base del láser TITAN (petavatios) ya operativo que libera 150 J en 500 fs combinando dicho pulso con pulsos de alta energía y larga duración, justo lo necesario para realizar los experimentos de ignición rápida. Ideas similares aparecen para la combinación del Z-pinch de Sandia N.L con estos sistemas de petavatios.

Pasemos a describir una última idea en fusión inercial a la hora de conseguir energía: uso de rayos X generados por Z-pinch (Figura 13). La implosión de blancos de gran tamaño guiados indirectamente por rayos X es una idea generada en el Laboratorio Nacional de Sandia (EE. UU) y que surge de su gran experiencia en potencia pulsada. Como se ve en la figura, independientemente de la opción prototipo elegida, el objetivo es conseguir el calentamiento y compresión de

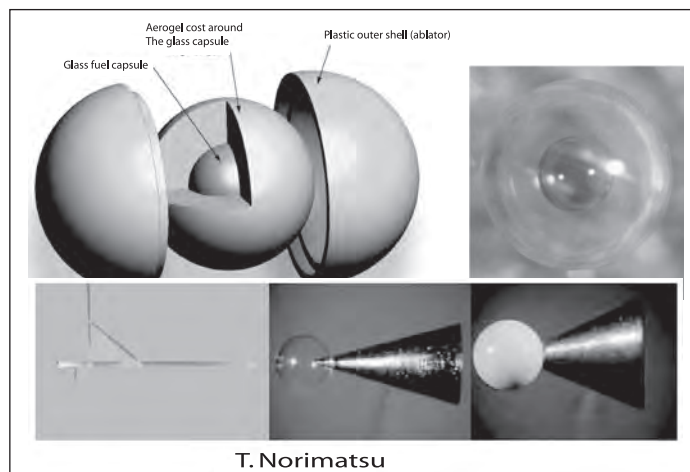


Figura 10.- Blancos de doble capa (superior / LLNL) y de ignición rápida (ILE/Norimatsu) que muestran la complejidad de estos dispositivos microscópicos

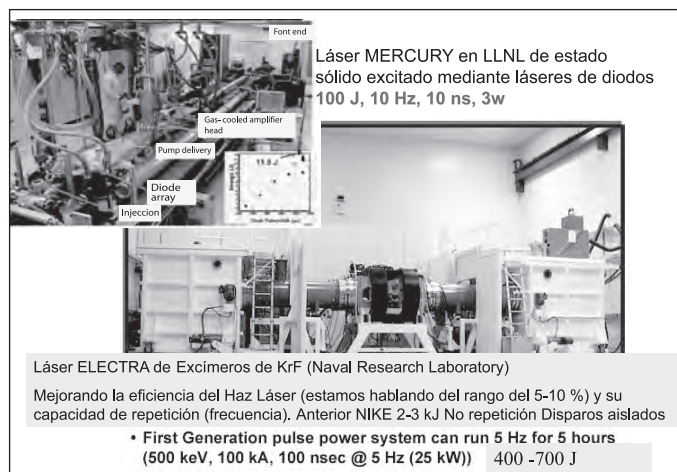


Figura 11.- Instalaciones en el Naval Research Laboratory investigando láseres de excimeros y de LLNL con el sistema de bombes por diodos.

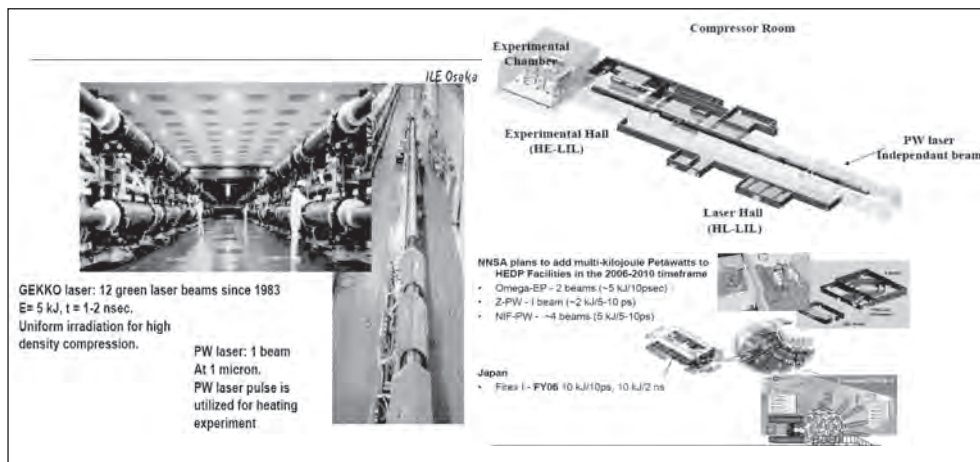


Figura 12.- Instalaciones demostradoras de la Ignición rápida FIREX (izquierda ya construida en ILE Osaka, Japón, esperando los primeros resultados 2007) y PETAL (derecha, aprobada su construcción en ILP/CEA Burdeos, Francia) e iniciativas en EE.UU.

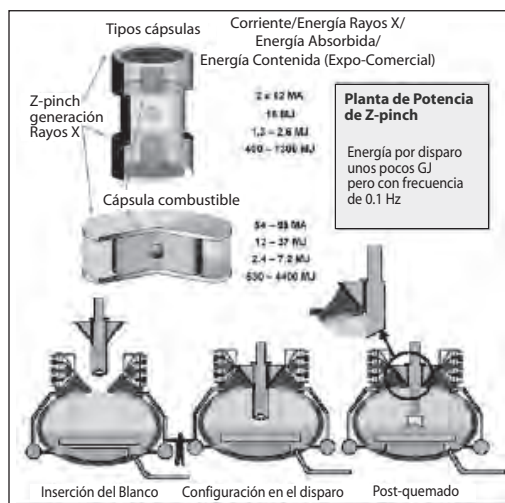


Figura 13.- Idea de Fusión Inercial basada en iluminación indirecta mediante la generación de Rayos X producidos por calentamiento de un sistema mediante Z-pinch, propuesto por el Laboratorio Nacional de Sandia (EE.UU)

un plasma mediante el efecto electromagnético de potencia pulsada Z-pinch de manera que se genere un muy intenso campo de rayos X que ilumine la cápsula que se puede visualizar en el centro del dispositivo. La característica fundamental de esta idea es que se podría conseguir pulsos de rayos X de ≈ 16 MJ para el caso de Fusión Inercial para Energía que con los rendimientos ya conseguidos darían generaciones de energía de unos pocos Gigajulios (GJ), lo que permitiría relajar las condiciones de repetición en el Sistema de Potencia pasando a ≈ 0.1 Hz.

En la Figura 9 se representaba el esquema de una planta de potencia con sus diversos subsistemas tal y como ya se ha comentado en la Introducción. El sistema clave tecnológico es lo que se conoce como cámara de reacción, en la que para una emisión, por reacciones de fusión nuclear, de energía cinética de partículas (neutrones, partículas cargadas y rayos X) dada, ≈ 1000 MJ, se debe de ser capaz de rescatar eficientemente dicha energía, reproducir tritio en cantidad suficiente y su-

perior al usado en los blancos, y aguantar el impacto y el daño producido por la irradiación de manera eficiente. Varios han sido los diseños que se han concebido a lo largo de la investigación que pasa aún por dilucidar muchos aspectos de física básica de los materiales y de otros componentes. No se va a entrar aquí en detalles, pero sí indicar que una ventaja sustancial en este aspecto entre las cámaras de reacción de los sistemas de confinamiento magnético e inercial, es que en estos últimos es perfectamente factible diseñar un dispositivo a través del cual además de conseguir la recuperación de energía en un ciclo termodinámico y reproducir tritio, se consigue proteger los materiales estructurales de la cámara. En el caso del diseño representado en la figura esto se realiza mediante chorros de un refrigerante como LiPb ó Flibe de unos 60 cm de espesor que caen a través de las paredes de la cámara, extrayendo en su caída la energía depositada por las partículas emergentes de la fusión en el centro de la cámara y generando tritio a través de la interacción de los neutrones producidos en la fusión central con el Litio componente de dichos metales líquidos. Un dispositivo que representa este concepto es el HYLIFE-II, que supone el uso de haces de iones pesados y donde el fluido extractor de energía que baña las paredes de la cámara moviéndose verticalmente de arriba abajo con un espesor de 50-60 cm es Flibe. Existen otros conceptos, como el denominado SOMBRERO, en el que se utiliza una cámara de pared seca e iluminación directa de blancos por medio de láser (Ejemplo: KrF); en este concepto la cámara de reacción se compone de un material compuesto basado en C/C para las estructuras de la cámara, y un manto reproductor que consiste en un lecho fluido de partículas sólidas de Li_2O , estando compuesta la atmósfera de la cámara por gas Xe como protección de la primera pared.

Fusión por Confinamiento Inercial:

- Elegir la opción óptima entre ignición central y rápida y las tecnologías involucradas.

- Demostrar las fuentes de iluminación láser de alta eficiencia (al menos $> 10\%$) y de alta capacidad de repetición (1-5-10 Hz), con energías de algunos Megajulios en el caso de Ignición Central y de algunos cientos de Kilojulios para la Ignición Rápida combinado, en este caso, con un láser de algún Kilojulio y con potencia de Petawatts. La otra opción sería la demostración de una fuente de iluminación de esas características pero basada en iones pesados.

- Demostrar la capacidad de fabricación de las cápsulas combustibles de una manera masiva y con alta capacidad de repetición, junto a sus sistemas de inyección y seguimiento para su posicionamiento correcto en el interior de la cámara de reacción.

- Demostrar las envolturas de los reactores (como en magnético) pero en este caso quedaría la posibilidad de alcanzar desarrollos tecnológicos capaces de proteger la primera pared estructural del reactor mediante dispositivos fluidos.



José Manuel Perlado Martín es catedrático de universidad (Física Nuclear) por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSI) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM). Director del Instituto Fusion Nuclear de la UPM desde diciembre 2004.

Miembro co-fundador del Instituto de Fusión Nuclear (DENIM) de la UPM.
Funcionario científico en excedencia de la Junta de Energía Nuclear (actual CIEMAT).
Miembro del Comité Consultivo de EURATOM/ Fusión para el VI y Séptimo Programa Marco. Ha sido Coordinador de Tareas en el Proyecto Europeo SIRENA de análisis de daño en ZrNb y de la Red de Excelencia europea ITEM de Modelos Multiescala para la simulación de materiales, y en el Proyecto PERFECT.
Co-Coordinador del IAEA Coordinated Research Program sobre Inertial Fusion Energy 2001-2005 y 2006-2010. Es coordinador de uno de los Grupo de Trabajo del Proyecto HiPER presentado a la Unión Europea dentro del Programa ESFRI. Es también coordinador científico dentro de la UPM de las tareas del Broader Approach / IFMIF y materiales, y del Proyecto TECNOfusion. Desarrolla actualmente proyectos del Plan Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación, y del Consejo de Seguridad Nuclear y Asociación Nacional Eléctrica (UNESA) en las áreas de Fusión Inercial y Simulación Microscópica del Daño por Irradiación en Materiales. Profesor Invitado de la Universidad de Osaka y Colaborador científico del Lawrence Livermore National Laboratory.