

CONFERENCIA

La Fusión Nuclear: Tecnología energética clave para el futuro de la Humanidad*

Nuclear Fusion: A Key Energy Technology for the Future of Mankind

José Luis Ocaña Moreno

Académico de Número de la Sección de Ingeniería de la Real Academia de Doctores de España
jlocana@etsii.upm.es

RESUMEN

Desde la fundamentación de los conceptos físicos que la sustentan (realización efectiva en laboratorio de experimentos de confinamiento magnético de plasmas en los años cincuenta del siglo XX y propuesta del confinamiento de blancos de Fusión mediante láseres en los años sesenta del mismo siglo), la Fusión Nuclear se consideró como una fuente de energía de extraordinario potencial capaz de satisfacer a largo plazo y de forma ilimitada la demanda energética de la Humanidad.

A partir de las sucesivas crisis de recursos energéticos fósiles de finales del siglo XX se han establecido en los países más avanzados programas de investigación y desarrollo coherentes y suficientemente dotados encaminados a la determinación de forma práctica en que dicha fuente de energía podía ser puesta a disposición de su utilización por la sociedad. En la práctica, a lo largo de los siguientes años y hasta el momento presente, se ha vivido un estado de constante expectativa sobre la fecha en la que la fusión nuclear pueda ser finalmente una energía aprovechable.

Sin embargo, a pesar de los brillantes y esperanzadores resultados obtenidos en las más avanzadas instalaciones experimentales en los últimos años, no parece, que la Fusión Nuclear en cualquiera de sus versiones tecnológicas vaya a experimentar una rápida progresión programada hacia los niveles de reactor de potencia. Sí que son previsible, no obstante, avances significativos en lo referido a la física del confinamiento y la compresión por haces intensos y no pueden excluirse desarrollos puntuales de gran significado derivados de estas investigaciones que puedan suponer avances importantes en el camino hacia el reactor nuclear de Fusión.

PALABRAS CLAVE: Fusión Nuclear, Energía Nuclear, Recursos Energéticos, Física de Plasmas, LASER, Materiales estratégicos.

ABSTRACT

Nuclear Fusion was considered as an extremely powerful energy resource as soon as the central years of XX Century, when several experiments showed the possibility of plasma confinement by electromagnetic fields and matter confinement by powerful lasers.

As a response to the successive energy crises related to the shortfall of fossil fuels during the last years of the same Century, many R&D programs were launched having the main objective of reaching the experimental conditions for the availability of Nuclear Fusion (in either of the magnetic or inertial approaches) as a practical energy source.

* Sesión académica de la RADE. Conferencia pronunciada en la sesión celebrada el 20-04-2022.

However, besides the bright and transcendental results obtained in the most advanced Nuclear Fusion facilities along the last years, the practical availability of this technology with its unlimited energy potential still remains an unattained goal and a subject of intense research hopefully yielding breakthrough results in the next years.

KEYWORDS: Nuclear Fusion, Nuclear Energy, Energy Resources, Plasma Physics, LASER, Strategic Materials.

Desearía, en primer lugar, agradecer las amables palabras de presentación a cargo del Presidente de la Sección de Ingeniería de la RADE, así como la oportunidad que hoy se me brinda de dirigirme a todos Vds. abordando uno de los temas que, sin duda, concitan en la actualidad un mayor nivel de interés, cual es el relativo a las fuentes de energía y, en particular, el relativo a una de las tecnologías llamadas a satisfacer la demanda energética del futuro de la Humanidad: la Fusión Nuclear.

Ya a finales del curso 2020-2021, y bajo la coordinación de la Académica Dra. Moratilla, se abordó la primera de una serie de contribuciones de la Sección de Ingeniería de la Academia encaminadas a presentar los aspectos más sobresalientes de las tecnologías que de forma más influyente configuran el devenir de la Humanidad. En aquel momento se abordó el tema de las Materias Primas críticas como reto para la transición energética, cuestión cuya fundamental importancia pudo comprobarse en aquella sesión, y hoy traemos ante todos Vds. un tema considerado asimismo de gran relevancia, tanto tecnológica, como económica y de impacto social a largo plazo, como es el de la satisfacción de la demanda energética del Planeta y, en particular, el de una de las fuentes de energía considerada como la llamada a proveer de forma sustancial los recursos para el consumo energético de la Humanidad.

Se trata, en efecto, de la Fusión Nuclear, denominación genérica bajo la cual se incluyen las distintas variantes de reacciones nucleares responsables de la generación de energía en las estrellas y cuya reproducción a escala terrestre se pretende llevar a cabo de forma aprovechable a través de distintos procedimientos con el fin de disponer de un recurso energético tecnológicamente utilizable para la satisfacción de la demanda por parte de la Humanidad.

A lo largo de los siguientes párrafos se tratará, pues, de presentar ante todos Vds. los fundamentos científicos subyacentes a los procesos de Fusión Nuclear y su papel en la Nucleosíntesis de elementos químicos y en la generación de energía en las estrellas; los fundamentos de las tecnologías desarrolladas a escala terrestre para la reproducción de dichos procesos con posibilidades realistas de aprovechamiento energético; los distintos esfuerzos tecnológicos puestos en juego para la realización práctica de dichas tecnologías y sus resultados más sobresalientes; la evaluación de las tecnologías de Fusión Nuclear desde un punto de vista de sostenibilidad energética y medioambiental para la supervivencia del Planeta; y, finalmente, una valoración sobre las perspectivas reales de obtención de condiciones operativas concretas para las implantación de la Fusión Nuclear como fuente estable y duradera de energía para la satisfacción de las necesidades energéticas de la Humanidad.

INTRODUCCIÓN: LAS REACCIONES DE FUSIÓN NUCLEAR

El fundamento para la obtención de elevadas liberaciones de energía por procesos de fusión nuclear se halla en la propia naturaleza de las fuerzas que mantienen unidos protones y neutrones en los núcleos atómicos. En tal tipo de reacciones tiene lugar una reacomodación de las partículas constituyentes de manera que, como resultado de la misma, las partículas quedan agrupadas según un estado caracterizado por una menor masa en reposo que, de acuerdo con la relación de Einstein, $\Delta E = -\Delta m \cdot c^2$, supone una liberación positiva de energía traducida en un incremento de energía cinética de las partículas resultantes de la reacción.

Una estimación cualitativa de los tipos de núcleos capaces de sufrir procesos de fusión nuclear con balance energético positivo en la forma descrita puede obtenerse a través del análisis de la estabilidad relativa de los núcleos -medida a través de su energía de enlace por nucleón (partícula integrante del núcleo atómico, protón o neutrón)- en función de su número másico. Tal parámetro nos proporciona directamente el valor de la masa en reposo que cada núcleo pierde al formarse a partir de sus constituyentes elementales (protones y neutrones a este nivel de descripción) y, por consiguiente, de la energía que en tal proceso de formación queda liberada.

A través de la consideración de dicha variación de energía de enlace por nucleón en función de número másico, se puede observar, por ejemplo, que el núcleo de Helio-4 (${}^4_2\text{He}$), constituido por 2 protones y 2 neutrones, presenta un valor de esta magnitud comparativamente mucho mayor que el de los núcleos de su entorno. Ello quiere decir que, dado un conjunto de protones y neutrones, la formación de un núcleo de Helio-4 comportará mayor liberación de energía por cada nucleón constituyente que la formación de cualquiera de dichos núcleos adyacentes. Y viceversa, la ruptura o disgregación de un núcleo de Helio-4 exigirá por unidad de nucleón constituyente mayor aporte de energía que la disgregación de uno de dichos núcleos vecinos.

Traduciendo todo esto a un análisis cuantitativo, de la consulta de datos concretos recogidos en las tablas de datos atómicos se deduce que la disgregación de un núcleo de Helio-4 en sus 4 nucleones (2 protones + 2 neutrones) requerirá un aporte de $4 \times 7,10 \text{ MeV} = 28,40 \text{ MeV}$ y, viceversa, la combinación de esos 4 nucleones (2 protones + 2 neutrones) para formar un núcleo de Helio-4 desprenderá el citado valor $Q_1 = 28,40 \text{ MeV}$.

De forma similar, evaluando el aporte de energía necesario para la disgregación de 2 átomos de Deuterio (${}^2_1\text{H}$; cada núcleo con 1 protón y 1 neutrón), se obtiene que dicho valor es $2 \times 2 \times 1,14 \text{ MeV} = 4,56 \text{ MeV}$, de manera que la combinación de 2 protones y dos neutrones para dar lugar finalmente a dos núcleos de Deuterio dará lugar a la liberación energética de sólo $Q_2 = 4,56 \text{ MeV}$.

La comparación entre ambas energías pone de manifiesto el hecho de que la formación del núcleo de Helio-4 a partir de sus constituyentes conlleva una mayor liberación de energía en términos relativos que las de sus núcleos vecinos y, a la inversa, su ruptura en fragmentos elementales exige un mayor aporte de energía que en el caso de dichos núcleos vecinos.

Siguiendo este razonamiento se llega al conocimiento de la razón subyacente a la obtención de balances netos positivos de energía por procesos de fusión nuclear: se trata, efectivamente, de aportar la energía suficiente para que dos núcleos de relativamente baja energía de ligadura por nucleón (como, por ejemplo, el Deuterio), queden disgregados y esperar que la formación de un núcleo de elevada energía de ligadura por nucleón (como, por ejemplo, el de Helio-4) libere energía en medida mayor que la necesaria en la etapa de puesta en reacción de los núcleos iniciales. Así, por ejemplo, la disgregación de 2 núcleos de Deuterio y la posterior formación de un núcleo de Helio-4 (símil físico del proceso global de reacción entre dos núcleos de deuterio para dar el mismo núcleo de Helio-4) daría lugar a una ganancia neta de energía de $Q = Q_1 - Q_2 = 28,40 \text{ MeV} - 4,56 \text{ MeV} = 23,84 \text{ MeV}$.

Teniendo en cuenta la gran cantidad de núcleos contenidos en una masa apreciable de materia ($\sim 3 \cdot 10^{23}$ núcleos de Deuterio por cada gramo de dicho material puro), se puede al menos intuir en esta primera aproximación el enorme potencial energético que las reacciones de fusión nuclear suponen.

Sin embargo, la realización de procesos como el indicado reviste problemas asociados tanto a la propia física de las reacciones nucleares como a los dispositivos experimentales necesarios para llevarlas a cabo.

En primer lugar, se tiene el carácter vinculante que para el desarrollo de procesos físicos en la naturaleza revisten las leyes de conservación. En virtud de ellas, no todas las posibles reacciones imaginables pueden verificarse y sólo el ajuste de las mismas a determinados criterios de conservación y relaciones de cuantización las hará factibles.

Por otra parte, se tiene que, de todas las posibles reacciones entre núcleos ligeros, no todas dan lugar a procesos de fusión nuclear con balance energético positivo ($Q > 0$), sino que sólo aquellas que generen como producto final alguno de los núcleos relativamente más estables (Helio-4, Carbono-12, Oxígeno-16...) serán útiles para la producción de energía a gran escala. No obstante, la factibilidad de determinadas reacciones no directamente aplicables a la generación de balance neto de energía servirá, sin embargo, con otros propósitos tales como la regeneración de material útil (combustible de fusión nuclear).

En lo referido a la realización práctica de las reacciones de fusión nuclear, y teniendo aún como argumento principal la propia física de los procesos, se tiene que el mismo es (a pesar de que ello parezca una verdad evidente) de naturaleza eminentemente “nuclear”, es decir

que, a diferencia de otros procesos tales como los bien conocidos de naturaleza química, son los núcleos (constituyentes más inaccesibles de la materia a moderadas energías) los implicados en el desarrollo de los mismos. Por ello, la primera consideración a tener en cuenta se refiere al hecho de que para que dos núcleos (partículas con carga eléctrica positiva) puedan llegar a interpenetrarse y dar lugar a un proceso de fusión nuclear, deben vencer previamente la repulsión electrostática mutua derivada de su carácter de partículas cargadas y acercarse hasta distancias suficientemente cortas para que puedan entrar en acción las fuerzas nucleares, mucho más fuertes que las de tipo eléctrico, pero de mucho más corto alcance.

De acuerdo con la ley de Coulomb, dos cargas puntuales se repelen con una fuerza electrostática directamente proporcional al producto de los valores de dichas cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Según esta ley, cuando la distancia entre dichas cargas es muy grande, el valor de la fuerza de repulsión es pequeño, pero, cuando éstas se aproximan, el valor de dicha fuerza de repulsión se hace muy elevado.

Sin embargo, a distancias suficientemente pequeñas, la fuerza electrostática de repulsión no es la única que actúa sobre dichas partículas (los núcleos en interacción), sino que entonces entra en juego la actuación de las fuerzas nucleares, fuerzas de atracción entre los nucleones (protones y neutrones) integrantes de los núcleos, de muy corto alcance, pero de un muy superior carácter atractivo en relación con la fuerza electrostática de repulsión.

En estas circunstancias, si un núcleo (por ejemplo, de Deuterio) se acerca a otro (por ejemplo de Tritio (^3_1H) con una energía cinética inicial, a medida que la distancia entre ambos disminuye, el núcleo incidente va perdiendo energía cinética (velocidad) por efecto de la repulsión eléctrica ejercida sobre él por el segundo, y puede llegar a quedar completamente detenido y ser reexpelido en sentido contrario si su energía no es suficiente para superar la citada barrera de repulsión electrostática y penetrar hasta el dominio de acción de las fuerzas nucleares. Sin embargo, si su energía cinética inicial es suficiente para la superación de dicha barrera, las citadas fuerzas nucleares pueden entrar directamente en acción y dar lugar a los procesos de reordenación de las interacciones entre nucleones correspondientes al proceso de fusión.

De acuerdo con lo dicho, parecería que la interacción de tipo nuclear citada sólo sería posible en el caso de que la energía cinética relativa de las partículas en interacción fuera suficientemente elevada para la superación de la citada barrera electrostática y, según esto, sería tremendamente difícil el conseguir procesos de fusión entre núcleos. Sin embargo, realizando cálculos a la luz de lo predicho por la Física Cuántica (la apropiada para el estudio de procesos a nivel microscópicos como el tratado), puede demostrarse la posibilidad de que el proceso de fusión nuclear se realice con energías cinéticas de las partículas en

interacción muy inferiores a las requeridas para la superación de la barrera electrostática en virtud del llamado “efecto túnel”, pero persistiendo, no obstante, la necesidad de que dichas energías cinéticas sean suficientemente elevadas si se desean obtener ritmos de reacción suficientemente elevados (como se requiere desde un punto de vista de producción de energía a gran escala).

Siguiendo este razonamiento, se puede llegar de una forma natural a la lógica de la obtención de energía a partir de procesos de fusión nuclear: aportando la energía suficiente para que dos núcleos de relativamente baja energía de ligadura por nucleón sufran interacción según el mecanismo descrito, superando o franqueando cuánticamente la mutua barrera de repulsión electrostática, esperamos que la formación de un núcleo de elevada energía de ligadura por nucleón (como, por ejemplo, el de Helio-4) libere energía en medida mayor que la necesaria en el previo aporte energético.

REQUERIMIENTOS TÉCNICOS PARA EL DESARROLLO MASIVO DE PROCESOS DE FUSIÓN NUCLEAR: MÉTODOS DE CONFINAMIENTO

Conociendo la física de la formación y disgregación de los núcleos, la idea de la obtención de energía por procesos de fusión nuclear resulta sencilla. Sin embargo, las dificultades para la realización práctica de procesos como el indicado revisten una naturaleza bien distinta de la puramente física: la sencillez (a este nivel) del concepto de reacción nuclear de fusión contrasta ampliamente con las dificultades de índole tecnológica de necesaria superación para la obtención de ritmos estables de tales reacciones capaces de proporcionar la liberación energética suficiente para el mantenimiento del proceso con balance energético positivo de energía en una central generadora.

En efecto, como consecuencia del largo alcance de las interacciones de tipo electrostático, este tipo de colisiones entre núcleos (con desviación de los mismos de su trayectoria original) ocurren con mucha mayor frecuencia que los procesos de colisión que dan lugar a la verificación de la reacción de fusión nuclear propiamente dicha.

Como consecuencia de esta baja probabilidad de los procesos de fusión, si se desea que éstos ocurran en número suficiente para poder obtener un buen rendimiento energético del proceso global de aporte-recuperación energéticos, la correspondiente mezcla de núcleos de las especies cuya reacción se busca (por ejemplo Deuterio y Tritio) ha de mantenerse durante un cierto tiempo en una cámara de reacción y a la mayor densidad posible al objeto de hacer mayor el número total de colisiones entre partículas y, consiguientemente, el de colisiones que den lugar de forma efectiva a procesos de fusión.

Por otra parte, y al objeto de hacer aumentar de manera suficiente (para que el proceso global sea energéticamente favorable) la proporción de este tipo de colisiones se ha de proporcionar a los núcleos integrantes de la mezcla una energía cinética suficientemente elevada que haga más probables los procesos de fusión, de acuerdo con lo apuntado sobre mayor facilidad para atravesar la barrera de potencial electrostático a medida que crece la energía cinética.

Como consecuencia, precisamente, de requerirse este elevado número de colisiones entre núcleos con el consiguiente intercambio de energía entre los mismos, la única forma de aportar energía a un colectivo suficientemente grande de ellos es someterlos a un proceso de deposición de energía y/o compresión en el cual aumente de forma significativa su densidad y/o energía cinética promedio (determinada en condiciones de equilibrio térmico por su “*temperatura*”). A este respecto, hay que tener en cuenta que, en dichas condiciones, el colectivo de partículas tiende a dispersarse rápidamente y perder energía en forma radiante como consecuencia de tres mecanismos básicos:

- i) Radiación de origen puramente térmico (radiación de cuerpo negro) de acuerdo con la ley de Stefan-Boltzmann, mecanismo que resulta importante en el caso de medios mantenidos a elevadas temperaturas (típicamente los núcleos y atmósferas estelares)
- ii) Radiación de sincrotrón, debida al movimiento de los electrones (que forman, junto con los núcleos, parte de la materia sometida a compresión y calentamiento) alrededor de las líneas de fuerza de los virtuales campos externos aplicados para comprimir el medio.
- iii) Radiación de frenado (*Bremsstrahlung*, según la nomenclatura de origen alemán de uso más extendido) debida a la deceleración que sufren los electrones en presencia de los campos eléctricos originados por las demás partículas del medio (típicamente los núcleos) que, a las temperaturas usualmente alcanzadas, se encuentran en estado disociado constituyendo un plasma, y que es el mecanismo más importante de enfriamiento a tener en cuenta en los sistemas de fusión nuclear a escala terrestre.

Como consecuencia de estos mecanismos de pérdida energética del medio en el cual se pretenden realizar reacciones de fusión a escala macroscópica, y en especial el correspondiente a la radiación de frenado, para cada composición característica de dicho medio existe una temperatura crítica, usualmente denominada “*temperatura de ignición*” por debajo de la cual no se puede lograr un balance positivo de energía por calentamiento del mismo.

Según todo lo dicho, se obtiene que las tres condiciones básicas para la obtención de energía a partir de procesos de fusión nuclear a gran escala son:

- i) Compresión de la mezcla de núcleos susceptibles de reacción a elevadas densidades.
- ii) Confinamiento de la mezcla comprimida durante un tiempo suficiente para que puedan desarrollarse procesos de fusión de manera estable.
- iii) Calentamiento de la mezcla hasta temperaturas que supongan una energía promedio suficientemente elevada para que los núcleos experimenten con probabilidad razonable procesos de fusión nuclear sin que su energía se disipe a ritmo mayor que el de generación de la misma por reacciones de fusión.

Teniendo en cuenta la magnitud de las energías cinéticas requeridas en los núcleos en reacción (cuyo valor promedio viene dado en condiciones de equilibrio termodinámico a través de la temperatura de la mezcla, $\langle E_c \rangle = \frac{3}{2} kT$, con $k \equiv$ Constante de Boltzmann, $T \equiv$ Temperatura absoluta), aparece como ciertamente difícil el someter a un cierto colectivo de núcleos a las temperaturas de decenas de millones de grados Kelvin (muy superiores a las manejadas a escala convencional) implicadas por dicha relación.

En efecto, resulta evidente que no existe foco térmico conocido a escala terrestre capaz de suministrar tal energía según mecanismos de pura transmisión de calor. Sin embargo, no es este, como se verá, un enfoque adecuado de la cuestión, ni el de obtención de elevadas temperaturas en los combustibles de fusión un problema crítico, si bien es uno de fundamental resolución.

En efecto, el hablar de un medio en el cual la temperatura ha de ser de decenas de millones de grados Kelvin supone indicar que la energía cinética promedio de las partículas que en él existen va a ser del orden de decenas de millares de electrones-voltio y, asimismo, que dicho medio se hallará totalmente separado en electrones e iones, constituyendo lo que se conoce como un plasma.

Como consecuencia de la incapacidad de los materiales conocidos para soportar, siquiera localmente, el contacto con el gran colectivo de partículas de un medio a tales temperaturas sin causar su “enfriamiento” y sin sufrir una alteración significativa en sus propiedades (recordemos que hay del orden de 10^{23} partículas independientes en un gramo de materia y muchas más si esta se halla ionizada como aquí es el caso) y para soportar las elevadas presiones necesarias, el “confinamiento” de las mismas en condiciones de densidad y temperatura suficientes ha de llevarse a cabo por medios distintos de la contención material, habiéndose propuesto a este respecto multitud de procedimientos físicos y siendo los dos procedimientos conceptualmente significativos:

- i) El confinamiento por medio de campos electromagnéticos (confinamiento magnético)
- ii) El confinamiento por medios basados, a semejanza de los procesos de fusión que tienen lugar a escala estelar, en la inercia de la materia acelerada (confinamiento inercial)

La primera de las mencionadas vías (confinamiento magnético) aprovecha el carácter de partículas cargadas inherente a los constituyentes a nivel atómico de la materia, a saber, electrones y núcleos, que les hace sufrir la interacción electromagnética en un campo de fuerzas de este tipo.

En un medio cerrado en el cual se ha depositado suficiente energía para formar un plasma, los electrones e iones componentes se mueven aleatoriamente en todas direcciones, chocando entre sí y con las paredes del recipiente, perdiendo energía cinética en cada colisión y dando, consiguientemente, lugar al enfriamiento del sistema.

Pero, si alrededor de dicho medio, virtualmente en forma de tubo, se coloca un arrollamiento y se hace pasar por él una corriente eléctrica de elevada intensidad, en su interior se originará un campo magnético cuyas líneas de fuerza son paralelas al eje del tubo. En este caso, los electrones por un lado y los iones por otro describirán trayectorias helicoidales alrededor de las líneas de fuerza, quedando, de este modo, confinados radialmente dentro del tubo. Si, además, se disponen los adecuados campos electromagnéticos para que los electrones e iones se reflejen en los extremos del tubo, o bien se cierra éste sobre sí mismo constituyendo una cámara toroidal, las partículas quedarán también confinadas axialmente, pudiendo darse así las condiciones para su entrada en reacción según los criterios apuntados con anterioridad.

Así, en presencia del apropiado campo electromagnético externo, generado por el establecimiento de corrientes eléctricas de elevada intensidad, y una vez lograda la ionización del medio (conversión en plasma) por efecto de un “calentamiento” llevado a cabo mediante procedimientos diversos (calentamiento óhmico o por conducción, por ondas de radiofrecuencia, por inyección de haces de partículas neutras, etc.), los núcleos de las especies consideradas se ven obligados a seguir trayectorias de acuerdo con la variación de dicho campo, sufriendo de forma ordenada procesos de colisión con núcleos vecinos y dando lugar así, si sus niveles de energía cinética lo permiten, a procesos de fusión nuclear cuya energía desprendida ha de ser aprovechada en un circuito externo de refrigerante, comunicado, por lo general, con los componentes convencionales de un ciclo termodinámico típico de una central de producción de energía eléctrica.

En tal procedimiento se utiliza, pues, la energía proporcionada por un campo magnético generado externamente para mantener “caliente” (por encima de la llamada *temperatura*

de ignición a la cual la generación energética por procesos de fusión nuclear compensa la pérdida por el sistema como radiación de frenado de sus electrones) y “confinado” el plasma de fusión que, en tales condiciones, sea capaz de proporcionar el adecuado ritmo de reacciones y, además, durante un intervalo de tiempo suficientemente largo para que la multiplicación energética del proceso resulte conveniente (recuérdese que hasta llegar a las condiciones de reacción ha resultado necesario invertir grandes cantidades de energía en calentamiento y compresión por medio de campos electromagnéticos y otros medios).

En este sentido, el criterio limitativo básico para que un dispositivo basado en el principio de confinamiento magnético alcance condiciones de divergencia energética (multiplicación energética efectiva en el sistema completo superior a la unidad) resulta ser que el producto de la densidad de núcleos alcanzada y el intervalo de tiempo durante el cual se mantiene dicha densidad en condiciones de ignición (producto $n\tau$) sea mayor que un determinado valor, denominado “parámetro de Lawson” y que, para el caso particular de la reacción Deuterio-Tritio (la de más fácil realización práctica por presentar una más baja temperatura de ignición, alrededor de $45 \cdot 10^6$ K) y un más bajo valor del parámetro, viene a ser $10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$.

Teniendo en cuenta que, para que el confinamiento de un plasma por un campo magnético efectivo de forma que quede minimizado su contacto (y consiguiente enfriamiento) con las paredes sobre las cuales se ha de recuperar la energía de los productos de la reacción de fusión, no han de sobrepasarse determinados valores de densidad de partículas compatibles con los máximos valores de dicho campo disponibles o de concebible generación (sólo algunas decenas de unidades Tesla en el caso de los últimos imanes superconductores conocidos), la densidad máxima de los plasmas de fusión por confinamiento magnético viene limitada a valores sumamente bajos, del orden de los usuales en técnicas de vacío ($\sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$) y, por ello, aparte de ser necesarios potentes sistemas de generación de dichas condiciones de baja densidad (sistemas de vacío), los tiempos de confinamiento necesarios de acuerdo con el citado criterio de Lawson han de ser suficientemente largos (del orden de segundos o fracciones de segundo), lo cual encierra el problema fundamental de nacimiento y desarrollo de inestabilidades magnetofluidodinámicas.

Desde un punto de vista práctico, para la generación de los campos electromagnéticos necesarios en forma adecuada al calentamiento y al confinamiento requeridos, se hace necesario el empleo de circuitos de geometría electromagnética adecuada que sean capaces de mantener durante el tiempo necesario las condiciones de densidad y temperatura que permitan la “ignición” y “quemado nuclear” del combustible. El mantenimiento de dichas condiciones resulta ser el más crítico y difícil de conseguir, constituyendo el escollo fundamental a salvar en la carrera hacia la obtención de ganancia energética por esta vía.

En el camino de investigación seguido desde la propuesta del primer dispositivo de fusión por confinamiento magnético (mediados de los años cincuenta del siglo XX) hasta la fecha se han llevado a cabo grandes progresos y hallazgos científicos en física de plasmas y se ha diseñado y probado una gran cantidad de aparatos y variantes sobre los mismos.

Los “Tokamaks” (cámaras toroidales magnéticas) son los dispositivos de fusión por confinamiento magnético de futuro más prometedor en cuanto a sistemas generadores de energía y sobre ellos han recaído los mayores esfuerzos económicos y relativos a investigación en los últimos años. Varios dispositivos de este tipo (JET en Europa, TFTR en E.U.A, T-20 en Rusia, JT60 en Japón, entre otros) han venido desarrollando importantes programas de investigación con previsiones de continuidad para las próximas décadas y han venido obteniéndose significativos avances en la vía hacia la obtención de condiciones de ignición, si bien no han podido alcanzarse aún condiciones de multiplicación energética unidad (factibilidad científica).

Aparte de todos estos dispositivos y de algunos otros de más reciente aparición, el mayor esfuerzo cooperativo a nivel internacional (con participación conjunta de Europa, E.U.A., Rusia, China, Japón, Corea del Sur e India) se centra en el diseño, construcción y puesta en marcha del International Experimental Tokamak Reactor (ITER), situado en Cadarache (Francia) y sobre el cual se espera que puedan verificarse condiciones de factibilidad científica en la próxima década con vistas a la obtención de un sistema con producción neta de energía tecnológicamente aprovechable (condiciones de “Demostrador”) hacia 2050, existiendo, adicionalmente, un gran esfuerzo puesto en juego por China a través de sus llamados “Soles Artificiales” por liderar la carrera hacia la disponibilidad de reactores generadores de energía explotables comercialmente.

En todos los casos descritos, se espera que en los próximos años puedan ir quedando solucionados los problemas relativos a calentamiento y confinamiento conjuntos del plasma, si bien, una vez superados los aspectos de carácter marcadamente físico, se habrán de superar importantes problemas de carácter más tecnológico, tales como la puesta en marcha de sistemas de recuperación energética bajo elevadas densidades de potencia, construcción de cámaras de reacción a base de aleaciones de baja capacidad de activación por irradiación neutrónica, desarrollo de bobinas superconductoras generadoras de elevadísimos campos magnéticos, desarrollo de potentes sistemas de vacío, etc.

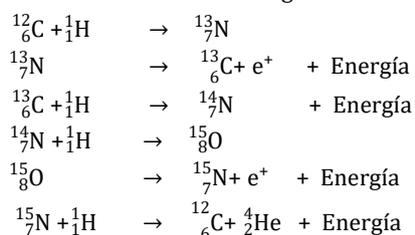
La segunda de las mencionadas vías de confinamiento del plasma hasta condiciones de fusión (confinamiento inercial) se basa en el calentamiento y confinamiento simultáneos de una masa de combustible nuclear hasta elevadísimas densidades y temperaturas por medio de la inercia propia de una masa fuertemente acelerada cuya energía cinética se convierte en energía térmica a través del desarrollo de ondas de compresión en su seno,

siendo potentísimos haces LASER o de iones acelerados los encargados de proporcionar a dicha masa la aceleración requerida.

Tal procedimiento trata de reproducir, a la conveniente escala, el proceso por medio del cual tiene lugar la generación de energía en las estrellas. En aquel caso, y como consecuencia de la elevada masa de las mismas, es la propia atracción gravitatoria (inercial) la responsable del confinamiento de los núcleos (en su mayoría de hidrógeno) a elevadísimas densidades y en condiciones de elevadísima temperatura y de la consiguiente liberación de energía por reacciones de fusión transmutadoras del Hidrógeno en Helio y elementos más pesados según el ciclo de Bethe¹, pieza clave en la nucleosíntesis de elementos químicos. En el caso de confinamiento de material de fusión mediante haces de elevada energía, el efecto confinante gravitacional es sustituido por la transformación de la cantidad de movimiento de la masa fuertemente acelerada por dichos haces en una intensa onda de presión (onda de choque) que nace como consecuencia de la propia inercia del material al ser detenido frente a un obstáculo o material previamente densificado.

La posibilidad de realización práctica de tal tipo de compresiones a escala terrestre no se acarició hasta la propuesta en 1961 por el premio Nobel soviético N.G. Basov y el científico estadounidense J. Nuckolls de manera independiente² de potentes haces LASER como agentes de la aceleración requerida. En fechas posteriores (primeros años setenta del siglo XX), y con el desarrollo de aceleradores de partículas de gran potencia, la posibilidad de obtención de las necesarias energías de compresión por haces de iones proporcionó una alternativa considerada en su momento como importante en la vía hacia la obtención del adecuado confinamiento hasta condiciones de fusión, si bien las complicaciones tecnológicas para la implantación de este tipo soluciones y los avances posteriores registrados en el desarrollo de nuevos sistemas LASER de gran potencia e intensidad, así

¹ Se conoce como Ciclo de Bethe el ciclo básico de reacciones de fusión nuclear según el cual tiene lugar la transmutación del hidrógeno en elementos más pesados (nucleosíntesis inicial) con la consiguiente producción de energía en las estrellas. Sus reacciones nucleares básicas con regeneración del núcleo de ¹²C son las siguientes:



² Los datos históricos de ambas proposiciones se recogen de manera conjunta en el volumen conmemorativo de los discursos de aceptación de la Medalla Edward Teller al mérito en el campo de la Fusión Nuclear, que ambos científicos recibieron en 1991. Las correspondientes citas son:

J.H. Nuckolls: “*Edward Teller Medal: Acceptance Remarks*”. Edward Teller Lectures: Lasers and Inertial Fusion Energy. H. Hora and G.H. Miley, Eds. World Scientific Publishing, pp. 85-88 (2005).

N.G. Basov: “*Comments on the history and prospects for Inertial Confinement Fusion*”. Edward Teller Lectures: Lasers and Inertial Fusion Energy. H. Hora and G.H. Miley, Eds. World Scientific Publishing, pp. 89-92 (2005).

como en el conocimiento de la física de la interacción de dicho tipo de haces con la materia ha motivado que este último tipo de sistemas sea el actualmente considerado como más prometedor para lograr las condiciones de fusión nuclear inercial a nivel de reactor.

Describiendo más precisamente la física de este proceso, en una primera fase un pequeño blanco esférico estructurado en diversas capas alrededor de una capa central de combustible de fusión (mezcla Deuterio-Tritio en la configuración más fácilmente conducible hasta condiciones de ignición) se inyecta en una cámara de reacción y es irradiada por un determinado número de haces sincronizados de radiación LASER o iones de elevada energía dispuestos simétricamente a su alrededor.

Como consecuencia de la rápida e intensa deposición energética por dichos haces sobre las zonas más externas del citado blanco, éstas comienzan a expandirse y a sufrir un proceso de ablación en virtud del cual (principio de conservación de la cantidad de movimiento) el material situado interiormente a un frente característico de velocidad nula (frontera entre material en ablación y material en compresión), comienza a sufrir aceleración hacia el centro geométrico de la microesfera.

Dicho movimiento alcanza pronto régimen supersónico y fuerza el establecimiento, frente al perfil de densidad creciente que se va encontrando, de un conjunto de ondas de choque que, al propagarse, comprimen el material hasta que su coalescencia en el centro hace subir bruscamente la temperatura en un entorno del mismo, situación que propicia la aparición a ritmo apreciable de reacciones nucleares de fusión.

Dichas reacciones de fusión dan lugar, de acuerdo con lo visto, a nuevos núcleos resultantes (núcleos de ${}^4_2\text{He}$ en el caso de reacción Deuterio-Tritio) que depositan su energía (en tanto que partículas cargadas en movimiento en un plasma denso) en los alrededores de la zona central a elevada temperatura, propagando las condiciones de fusión nuclear y haciendo que el quemado nuclear se propague hacia el resto del combustible.

Asimismo, las reacciones de fusión nuclear (en particular la Deuterio-Tritio) pueden dar lugar como productos de reacción a neutrones que, en función de su ausencia de carga, poseen un mayor recorrido libre y normalmente escapan del blanco y llegan para depositar su elevada energía cinética en las paredes de la cámara de reacción.

En su conjunto, el quemado nuclear del combustible de fusión contenido en la microesfera da lugar a la propagación hacia afuera de un frente de temperatura que propicia la expansión súbita de las capas más externas del blanco en la medida de lo permitido por la presión ejercida por la inercia de las mismas y finalmente a la disgregación termomecánica del blanco completo.

Tras esta disgregación, forzada de forma explosiva por la gran cantidad de energía resultante del quemado nuclear del combustible de fusión, los fragmentos portadores de la misma (neutrones, partículas cargadas, material no quemado y radiación electromagnética, básicamente) viajan hasta alcanzar las paredes de la vasija o cámara de reacción, donde depositan dicha energía sobre el adecuado material refrigerante circulante sobre la superficie o impregnante de ésta, material refrigerante que será, a su vez, el encargado de transportar la energía (ya en forma térmica) hasta los componentes del ciclo termodinámico recuperador de la misma en forma utilizable (central eléctrica).

A pesar de la aparente simplicidad de los procesos descritos en su conjunto, ha de hacerse notar la gran complejidad a nivel microscópico en cada uno. Así, desde el análisis de los distintos tipos de haces suministradores de energía (incluidos su diseño y características funcionales), pasando por el conocimiento correcto de sus mecanismos de interacción con el material de los blancos, considerando de forma especial los complejísimos fenómenos a nivel atómico y fluidodinámico determinantes de la evolución de los mismos hasta condiciones de ignición en el combustible y su posterior evolución en la fase de quemado nuclear, y concluyendo con el análisis de la deposición de energía por los fragmentos resultantes de la explosión sobre las paredes de la cámara de reacción (con sus limitaciones relativas a daño por irradiación y potencial activación radiactiva), puede comprenderse la realmente gran complejidad inherente a los sistemas del tipo tratado.

En la práctica, el problema clave para el logro de la factibilidad científica y tecnológica de la fusión por confinamiento inercial consiste en poder concentrar la energía necesaria para la obtención de una ganancia apreciable sobre el blanco a un coste razonable. Para ello, los haces de energía utilizados han de concentrar energías del orden de millones de unidades Joule sobre blancos de unos milímetros de diámetro en tiempos del orden de pocas milmillonésimas de segundo (potencias resultantes del orden de centenares de billones de vatios).

Según lo comentado, sólo los sistemas LASER de elevada potencia y los aceleradores de iones (ligeros o pesados) y, particularmente, los sistemas LASER, se vislumbran como sistemas capaces de ser encargados de la conducción del proceso de fusión por confinamiento inercial en las condiciones requeridas. En este sentido, los últimos avances conseguidos en generación de haces con longitudes de onda corta, ya fundamental o por multiplicación de armónicos, y de capacidad mejorada de interacción con los blancos a través de procesos de irradiación indirecta hacen reaparecer a este tipo de sistemas como los esencialmente prometedores para el logro de las condiciones de confinamiento requeridas. En particular, los desarrollos llevados a cabo en la National Ignition Facility (NIF) estadounidense constituyen, a pesar de sus múltiples retrasos y sucesivas postergaciones de objetivos clave, la vía considerada como más prometedora y plausible

para la demostración de factibilidad científica de la fusión inercial y la continuación de la carrera hacia su factibilidad tecnológica (reactor comercial).

Por su parte, los haces de iones pesados presentan unos elevados rendimientos en generación, fiabilidad y frecuencia de repetición, así como unas buenas características de acoplamiento energético con los blancos. Sin embargo, sus importantes necesidades de infraestructura y complejidad tecnológica sólo les permiten ser competitivos en las grandes escalas, es decir, en la fase en que pueda disponerse de grandes sistemas generadores de potencia por fusión, motivo por el cual su desarrollo ha venido siendo retardado con relación a otras alternativas.

En todos los casos, el análisis y caracterización precisa de los procesos físicos implicados en la evolución de los blancos de fusión inercial sometidos a compresión por haces energéticos constituye un elemento fundamental en el desarrollo con éxito de la investigación en torno a esta alternativa. En efecto, el conocimiento detallado de dichos procesos físicos y su correcto modelado en términos teóricos y/o numéricos en conexión con su ensayo experimental resulta de naturaleza imprescindible a la hora de evaluar la potencialidad real de dichos blancos como sistemas multiplicadores de energía.

PROGRESIÓN HACIA CONDICIONES DE VERIFICACIÓN EXPERIMENTAL DE LA FUSIÓN NUCLEAR A ESCALA TERRESTRE

Uno de los aspectos más atractivos de la Fusión Nuclear como fuente de energía es su potencial capacidad para la generación de cantidades ingentes de la misma de forma sostenible y duradera, y de una forma notablemente más segura y ambientalmente limpia que la mayor parte de las tecnologías energéticas actualmente en uso o de prevista utilización en un futuro próximo.

En efecto, la ausencia de posibles accidentes de criticidad, las menores consecuencias previsibles de accidentes con pérdida de refrigerante y el menor riesgo biológico tanto de los radioisótopos contenidos en la planta de generación de energía como de los residuos radiactivos generados hacen a los futuros reactores de Fusión notablemente más atractivos que los actuales reactores de Fisión. Y, por otra parte, habida cuenta del conocido impacto que sobre el medio ambiente generan los compuestos químicos liberados en la combustión de materias orgánicas (gas, derivados del petróleo, carbón, biomasa, etc.), los problemas asociados a la acumulación de anhídrido carbónico en la atmósfera a lo largo del ciclo de vida de otras fuentes de energía (incluida la solar, tanto fotovoltaica como de concentración), y otros problemas asociados a la falta de carácter sostenible para la cobertura a gran escala de la demanda energética de la Humanidad, la consecución de una

fuentes de energía, como la de Fusión Nuclear, con elevada proyección de disponibilidad a gran escala y que reduzca a niveles mínimos su potencial impacto ambiental gozará, inequívocamente, de un apoyo generalizado.

Con independencia de consideraciones de tipo distinto al puramente científico (que, por desgracia, siempre son posibles y repercuten indefectiblemente de forma negativa en la marcha de los desarrollos estrictamente científicos), el éxito final de la Fusión Nuclear como fuente de energía para el desarrollo futuro de la Humanidad depende de la superación de un conjunto de retos científico-tecnológicos que habrán de superarse de manera inequívoca para poder tornar a la misma como la realidad tan largamente esperada que proporcione de forma efectiva dicha disponibilidad energética a largo plazo.

En el ámbito de la fusión por confinamiento magnético, los puntos fundamentales sobre los cuales la investigación y desarrollo tecnológico han de centrarse con más énfasis en los próximos años son:

- i) Desarrollo de sistemas de vacío progresivamente más potente capaces de proporcionar los niveles de densidad y bajo nivel de impurezas necesarios para la obtención y mantenimiento de los necesarios niveles de temperatura en el plasma de fusión, contando con los volúmenes requeridos en el caso de los futuros reactores.
- ii) Desarrollo de circuitos magnéticos de suficiente eficiencia para la conversión de energía de excitación a campos magnéticos confinantes. En el caso de los reactores de potencia será imprescindible el uso de bobinas superconductoras, capaces de proporcionar valores de campo magnético del orden de decenas de unidades Tesla. Por otra parte, se requerirán diseños optimizados de la geometría y configuración de campos de las bobinas capaces de proporcionar el nivel suficiente de estabilidad de los plasmas que evite la disrupción catastrófica de los mismos.
- iii) Desarrollo de sistemas de generación y almacenamiento de energía de la magnitud necesaria para el funcionamiento de los sistemas externos de calentamiento de plasma requeridos a los elevados niveles de potencia buscados.
- iv) Desarrollo de sistemas avanzados de calentamiento de plasma, básicamente de sistemas de inyección de haces de partículas neutras, técnica considerada como la más favorable y apropiada a la escala de reactor de potencia.
- v) Desarrollo de materiales estructurales y funcionales (sobre todo primera pared) suficientemente resistentes a irradiación (fundamentalmente neutrónica, pero también relativa a otros productos de reacción) y conceptualmente “limpios” desde el punto de vista de generación de material radiactivo a los elevados flujos y extremos

regímenes de producción de partículas y radiación intensa presentes en los futuros reactores de fusión.

- vi) Desarrollo de sistemas eficientes de manejo de tritio, particularmente de sistemas de baja permeabilidad frente a este material a las elevadas temperaturas previsibles para la primera pared de los reactores. En la práctica esto obliga a una cuidada selección de barreras de contención estructurales y materiales de refrigeración en conexión con lo apuntado en v).

En cuanto a la fusión por confinamiento inercial, son áreas concretas, tanto físicas como tecnológicas, en las cuales la investigación ha de centrarse para la obtención de sistemas generadores de energía a gran escala:

- i) Diseño y construcción de sistemas generadores de haces de energía (sistemas LASER, haces de iones) de gran potencia, elevado rendimiento, elevadas frecuencias de repetición y adecuadas características como fuentes pulsantes de energía.
- ii) Diseño y construcción de sistemas suficientemente efectivos para el transporte y enfoque de haces energéticos (basados en sistemas LASER o en haces de iones) sobre los blancos de fusión. Si bien para el caso de los sistemas LASER de elevada potencia el problema clave para la obtención de haces de adecuadas características para la interacción con blancos de elevada ganancia es, fundamentalmente, el sistema generador en sí, en el caso de los haces de iones, el problema de transporte y enfoque del haz de energía es un problema crítico de cuya solución depende la propia factibilidad del proceso a escala industrial. Para que la Fusión Nuclear por haces de iones pueda concebirse a niveles de reactor, se ha de demostrar la factibilidad del transporte de elevadísimas corrientes de iones de gran energía con una mínima dispersión espacial hasta un blanco de unos milímetros de diámetro para hacerlo implotar en la forma descrita.
- iii) Desarrollo de métodos avanzados de caracterización (teórica y experimental) del comportamiento de los blancos sometidos a implosión. Al igual que en caso de la fusión por confinamiento magnético, la diagnosis con los instrumentos apropiados de los experimentos resulta de fundamental importancia a la hora de encontrar pautas de comportamiento (leyes físicas) de los componentes del plasma de fusión en las condiciones extremas de presión y temperatura a las que el mismo se ha de someter. En el caso de la fusión por confinamiento inercial, las elevadas densidades y temperaturas alcanzadas conjuntamente por los materiales integrantes de los blancos hace que se esté tratando con materiales condiciones extremas para las cuales

muchas veces no se tiene un conocimiento preciso de los mecanismos de interacción y respuesta frente a la energía depositada.

- iv) Desarrollo de métodos avanzados de diseño y fabricación de blancos o cápsulas combustible, con consideración expresa de los resultados del epígrafe anterior a la hora de seleccionar los regímenes adecuados para el desarrollo del proceso combinado de interacción-compresión-quemado nuclear-disgregación con un máximo aprovechamiento del combustible nuclear y con la máxima ganancia energética posible.
- v) Desarrollo de capacidades de diseño y construcción de cavidades, envolturas, sistemas de refrigeración, blindajes y otros elementos integrantes de los reactores de potencia. Al igual que en el caso de la fusión por confinamiento magnético, reviste en este punto especial importancia el aspecto referente a materiales, dado que, en este caso, las condiciones pulsadas de la deposición de potencia sobre la estructura refrigerante y de primera pared plantean una problemática específica de muy difícil solución y que concentra una gran parte de los esfuerzos de investigación en todo el mundo en el camino hacia un sistema demostrador de potencia por esta vía.
- vi) Asimismo, como en el caso de la fusión magnética, desarrollo de tecnologías apropiadas para la manipulación de tritio y otros elementos radiactivos generado en las instalaciones generadoras de potencia.

Revisando en conjunto el estado actual de los experimentos de Fusión Nuclear en todo el mundo y las perspectivas en el camino hacia los reactores del futuro, se puede decir que, en el campo de la Fusión Magnética, el confinamiento de plasma a elevadas temperaturas por sistemas de campos magnéticos se desarrolla de forma eficiente, habiéndose publicado en los últimos años importantes desarrollos referidos tanto a los sistemas generadores de los campos electromagnéticos requeridos (desarrollo de bobinas de materiales superconductores, por ejemplo), como a la geometría de campos electromagnéticos capaces de generar un confinamiento efectivo y estable, estando pendientes, sin embargo una proporción importante del resto de desarrollos necesarios hasta el logro de condiciones de multiplicación energética. La progresión del esfuerzo investigador cooperativo materializado en el dispositivo ITER asegura de momento el mantenimiento del ritmo de avances previsto en el momento de su proposición, pero, sin embargo, no se excluye la contribución de avances puntuales en el camino hacia las condiciones de reactor en la línea de los desarrollos recientemente publicados por diversos laboratorios en China, Corea, Japón y E.U.A.

De la misma forma, en el caso de la Fusión por Confinamiento Inercial, el desarrollo hacia una situación de factibilidad como fuente de energía a gran escala presenta aún, junto con

la necesidad de resolución de problemas más puramente tecnológicos, una fuerte componente relativa a la resolución de problemas de una marcada naturaleza física como consecuencia de las incertidumbres aún existentes en la caracterización de ciertos procesos ocurrientes a niveles de presiones y temperaturas hasta ahora no alcanzados en experimentos controlados a escala terrestre. Por este motivo, la progresión de avances hacia diseños cada vez con mayor plausibilidad desde el punto de vista energético viene siendo crecientemente crítica y se espera que pueda proporcionar resultados positivos en los próximos años.

EPÍLOGO: LA FUSIÓN NUCLEAR, ENERGÍA PARA EL FUTURO DE LA HUMANIDAD

Desde la fundamentación de los conceptos físicos que la sustentan (realización efectiva en laboratorio de experimentos de confinamiento magnético de plasmas en los años cincuenta del siglo XX y propuesta del confinamiento de blancos de Fusión mediante láseres en los años sesenta del mismo siglo), la Fusión Nuclear (en cualquiera de las dos vertientes) se consideró como una fuente de energía de extraordinario potencial capaz de satisfacer a largo plazo y de forma ilimitada la demanda energética de la Humanidad.

No obstante, sólo a partir de la “crisis del petróleo” de 1973 se establecieron en los países más avanzados programas de investigación y desarrollo coherentes y suficientemente dotados encaminados a la determinación de forma práctica en que dicha fuente de energía podía ser puesta a disposición de su utilización por la sociedad. En la práctica, a lo largo de los siguientes años y hasta el momento presente, se ha vivido un estado de constante expectativa sobre la fecha en la que la fusión nuclear pueda ser finalmente una energía aprovechable.

A pesar de los brillantes y esperanzadores resultados obtenidos en las más avanzadas instalaciones experimentales en los últimos años, no parece, sin embargo, que la Fusión Nuclear en cualquiera de sus versiones tecnológicas vaya a experimentar una rápida progresión programada hacia los niveles de reactor de potencia, si bien sí que son previsibles avances significativos en lo referido a la física del confinamiento y la compresión por haces intensos y no pueden excluirse desarrollos puntuales de gran importancia derivados de estas investigaciones que puedan imponer avances puntuales en algunos de los puntos identificados como de necesario desarrollo en el camino hacia el reactor nuclear de Fusión.

La razón fundamental para esta “lenta progresión” hay que buscarla en la percepción por parte de la sociedad y de las autoridades con responsabilidad en el ámbito energético del carácter “menos grave” de las sucesivas crisis energéticas que la evolución geopolítica internacional viene deparando en los últimos tiempos, percepción que en la práctica puede cambiar súbitamente, pero que hasta el momento no ha sido capaz de anticipar los

desarrollos y el esfuerzo en investigación necesarios para el logro de los hitos fundamentales que puedan culminar con la disponibilidad de la Fusión Nuclear como fuente de energía en un futuro próximo.

Por tanto, resulta obligado en este punto advertir una vez más sobre los riesgos del mantenimiento de una oferta energética como la actual, basada en fuentes difícilmente sostenibles y en gran medida nocivas y limitantes de las condiciones de vida sobre el Planeta, y abogar abiertamente por la puesta en práctica de políticas energéticas más responsables que promuevan e incentiven la necesaria investigación para que la disponibilidad de energía a gran escala procedente de reacciones de Fusión Nuclear pueda llegar a ser a tiempo una reconfortante realidad para las esperanzas de supervivencia de la Humanidad.