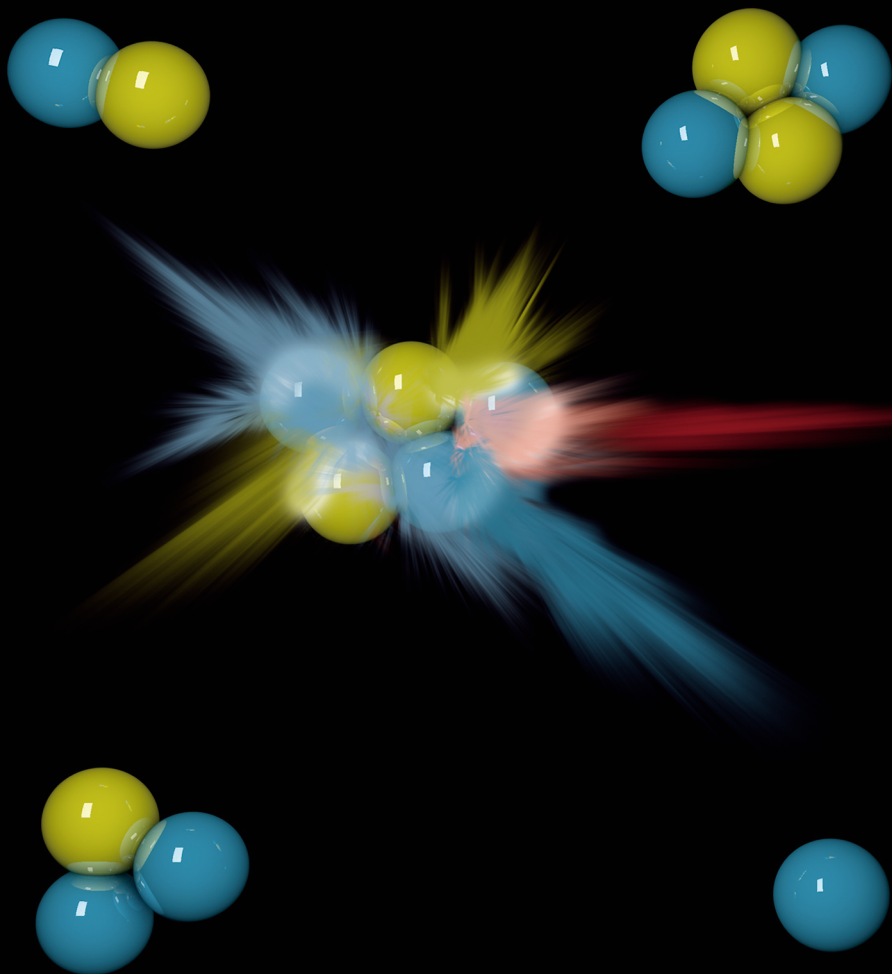


Curso Básico de Fusión Nuclear



CURSO BÁSICO DE FUSIÓN NUCLEAR

Coordinadores del proyecto:

Kevin Fernández-Cosials
Alfonso Barbas Espa

Autores:

Eduardo Oliva Gonzalo
Adriana Ortiz Gómez
Nuria Moral Fernández
Alejandro Carrasco Sánchez
José Manuel Perlado Martín
Raquel Suárez Hontoria
Manuel Cotelo Ferreiro

Revisor:

Alberto Foronda Delgado

Ilustración y edición técnica:

Enrique Sainz de la Cuesta

ISBN: 978-84-697-5718-5

Depósito Legal: M-25604-2017

Septiembre de 2017, Madrid

V_e



ÍNDICE

Agradecimientos.....	5
Prólogo.....	6
1 - Introducción a la Física Nuclear de Fusión I.....	7
2 - Introducción a la Física Nuclear de Fusión II.....	23
3 - Fusión por Confinamiento Magnético.....	45
4 - Fusión por Confinamiento Inercial.....	68
5 - Retos de la Fusión Nuclear.....	88
6 - La Fusión Nuclear en Perspectiva.....	110
7 - Actualidad de la FCM.....	130
8 - Actualidad de la FCI.....	143
9 - Fusión Nuclear y Desarrollo Sostenible.....	159
Glosario.....	172
Listado de autores.....	178

AGRADECIMIENTOS

Estimado lector,

Este libro es producto del esfuerzo altruista de muchas personas que, sin mayor recompensa en el horizonte que la satisfacción del trabajo bien hecho y el valor divulgativo de la obra creada, se han lanzado a la tarea de delimitar los límites, diseñar el programa, confeccionar los temas y revisarlos y, finalmente, acometer el complejo proceso de editar con la máxima coherencia los contenidos procedentes de tan cuidadosas pero dispares mentes. Todo agradecimiento hacia ellos es poco y debe empezar obligadamente por hacerles mención. Cada capítulo del libro ha pasado por un proceso de escritura y revisión, que ha elevado la calidad técnica y narrativa del mismo hasta donde el cariño y dedicación por lo escrito permite.

El primer agradecimiento es sin lugar a dudas para los autores del presente libro: Eduardo Oliva, Adriana Ortiz, Nuria Moral, Alejandro Carrasco, José Manuel Perlado, Raquel Suárez y Manuel Cotelo. A todos ellos gracias por hacer de este proyecto una realidad. A estos compañeros se les agradece doblemente, ya que además de autores de sus propios capítulos han sido, junto con Nuria Gordillo, revisores de otros; permitiendo la mejora técnica y formal de los mismos. Una mención especial merece Alberto Foronda, cuya atención al detalle y capacidad de trabajo pulieron el libro en su conjunto elevándolo al grado de calidad que el lector tiene ahora en sus manos.

Así mismo, damos las gracias a los ayudantes de dirección, Alejandro Carrasco y Nuria Moral, que han colaborado para engranar todas las piezas que este proyecto definitivamente ha necesitado.

No puede faltar el agradecimiento a la organización Jóvenes Nucleares, y por ende a la Sociedad Nuclear Española por todo el apoyo recibido, los medios, y la confianza depositada en este proyecto. Ha sido Jóvenes Nucleares quien ha apadrinado este libro, que a su vez servirá de guía para los distintos cursos que se realizan por toda España. En especial, gracias a José García Laruelo, presidente de Jóvenes Nucleares durante la mayor parte del desarrollo, por su fe, su desenvoltura y su convencimiento para con nosotros.

Por último agradecerte a ti, lector, por el tiempo que vas a dedicar a este libro, con cuya lectura esperamos que disfrutes y aprendas al menos tanto como lo hemos hecho nosotros al escribirlo.

Un amistoso saludo de los directores del Proyecto

Kevin Fernández-Cosials

Alfonso Barbas Espa

PRÓLOGO

Es ya manida la discusión y reflexión sobre el término *energía*, su necesidad intensiva en la sociedad, consecuencia del mayor consumo por habitante, el crecimiento de la población mundial, y el imperativo de encontrar nuevas fuentes de energía. Imperativo que está justificado y reforzado por el hecho de que los ya vetustos combustibles fósiles están en sus etapas finales y su combustión supone un riesgo cierto, pese a quien pese, para el equilibrio térmico de nuestro planeta y sus efectos asociados.

Lograr la fusión nuclear es, en su consecución fundamental, una tarea muy compleja donde se encuentran en juego las distintas leyes de la física. Sus fastuosas condiciones termodinámicas para conseguir que funcione la fuerza nuclear fuerte son el claro reflejo de nuestras estrellas y su vida. Domeñar para nuestro beneficio a la naturaleza hasta esta recreación de nuestro firmamento está suponiendo a la sociedad un siglo de esfuerzos. Pero merece la pena porque su logro dotará a nuestras sociedades de una parte de la solución energética de la humanidad. No será la única energía del futuro, las renovables sin duda estarán en primera fila, pero supondrá la alternativa energética única y capaz de suministrar la mayor energía por unidad de masa de la que el ser humano podrá disponer por varios órdenes de magnitud superior a cualquier otra, con propiedades de abundancia y seguridad.

Existen pocos libros en español sobre la Fusión Nuclear en general y a escala de introducción con alcance global de todos los procesos sin dejar ninguno. Este libro, que la cubre desde una perspectiva básica, supone una primera aproximación a la física y tecnología de esta fuente de energía para aquellos lectores que quieren conocer sus principios desde la física nuclear en la que se sustenta. Escrito por brillantes jóvenes nucleares que han tenido una buena y aprovechada preparación sobre la fusión nuclear en sus distintas opciones, tiene la peculiaridad única de responder a lo que ellos mismos tuvieron que plantearse y resolver no hace tanto.

Lo saludo con entusiasmo y le auguro un gran provenir.

J. Manuel Perlado

Director / Catedrático Física Nuclear

Instituto Fusión Nuclear / Universidad Politécnica de Madrid

1 - INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR DE FUSIÓN I

Eduardo Oliva Gonzalo
Autor

Manuel Cotel Ferreiro
Revisor

1. INTRODUCCIÓN

La física nuclear es el campo de la física que estudia el núcleo atómico, sus elementos constituyentes y las interacciones entre estos. Aunque se puede trazar el origen del concepto atómico de la materia hasta la antigua Grecia, la física nuclear es una disciplina relativamente reciente. Podemos decir que tuvo su origen en el descubrimiento de la radiactividad natural, realizado por Henri Becquerel en 1896. Su posterior desarrollo a lo largo del siglo XX debe considerarse como uno de los mayores logros de la historia de la ciencia. No en vano, la física nuclear nos ayuda a entender el origen y evolución de objetos astrofísicos como estrellas, supernovas, estrellas de neutrones y también nos permite desarrollar tecnologías como las centrales nucleares o la PET (Tomografía por Emisión de Positrones, por sus siglas en inglés).

Este capítulo de introducción se iniciará con un breve resumen de los hitos más importantes en el campo de la física nuclear (recuerde: son todos los que están, pero no están todos los que son). Continuará con una descripción del núcleo atómico, sus integrantes y su estabilidad, para finalizar con una explicación de las diferentes reacciones nucleares de interés para este libro. La lectura puede complementarse con la del primer capítulo del libro “Curso básico de ciencia y tecnología nuclear” [\[1\]](#).

2. BREVE HISTORIA DE LA FÍSICA NUCLEAR

A lo largo de la historia se han sucedido diferentes teorías sobre la composición de la materia. Aunque el concepto de atomismo (la materia está compuesta de partes indivisibles llamadas átomos) tiene sus raíces en la antigua Grecia (Leucipo y Demócrito, siglos V y IV a. C.) hay que esperar hasta el siglo XIX para poder hablar propiamente de una teoría atómica, con los trabajos de John Dalton y Amadeo Avogadro a principios del siglo XIX. La teoría atómica¹ explicaba de manera elegante los resultados experimentales en química. Así mismo, la asunción de que los átomos son partículas reales que pueden sufrir colisiones como bolas de billar permitió a Ludwig Boltzmann, Josiah Willard Gibbs y James Clerk Maxwell sentar las bases de la termodinámica y la mecánica estadística durante la segunda mitad del siglo XIX.

Sin embargo, no se puede hablar de estructura atómica hasta el descubrimiento del electrón por Sir Joseph John Thomson en 1897, un año después de que Henri Becquerel descubriera la radiactividad natural. El electrón es una partícula más pequeña que los átomos y, a diferencia de éstos que no tienen carga eléctrica, está cargado negativamente. Teniendo en cuenta estos hechos experimentales, Thomson propuso un modelo del átomo. Según este modelo el átomo dejaba de ser indivisible, pasando a estar formado por electrones “incrustados” en una masa de carga positiva. El modelo de Thomson estuvo vigente hasta 1909, año en el que Hans Geiger y Ernest Marsden realizaron un experimento en el que lanzaban partículas alfa (núcleos de helio cargados positivamente) contra una lámina de oro. Rutherford sugirió buscar partículas alfa que rebotaran al llegar a la lámina. El hecho de que la mayoría de las partículas atravesaran sin dificultad la lámina, mientras que una minoría se desviarían o incluso rebotaran, indujo a Rutherford a proponer un nuevo modelo atómico en 1911. En éste los electrones ocupan la mayor parte del volumen atómico, orbitando alrededor de un pequeño núcleo cargado positivamente. El núcleo aporta la mayor parte de la masa atómica. Durante los siguientes veinte años los avances en la estructura atómica se centraron en la dinámica de los electrones en átomos, principalmente gracias al advenimiento de la mecánica cuántica. Niels Bohr, Arnold Sommerfeld, Erwin Schrödinger, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg y muchos otros contribuyeron al desarrollo del modelo atómico actual.

La estructura nuclear del modelo de Rutherford proporcionó una poderosa

¹ Cada elemento químico está compuesto por átomos que no pueden ser alterados ni destruidos y que pueden combinarse entre ellos

herramienta para explicar los resultados experimentales obtenidos a lo largo de la breve, hasta ese momento, historia de la Física Nuclear. Los descubrimientos se sucedieron: Marie Skłodowska-Curie y Pierre Curie descubrieron el polonio y el radio en 1898. A principios del siglo XX, Ernest Rutherford acuñó la actual nomenclatura de radiación alfa, beta y gamma. Frederic Soddy descubrió que átomos del mismo elemento, con las mismas propiedades químicas, tienen distinta masa². De manera independiente, George Gamow por un lado y Ronald Gurney y Frank Condon por otro explicaron la radiación alfa usando el efecto túnel (ver capítulo 2, apartado 2) y Arthur Eddington propuso la fusión nuclear como el origen de la energía de las estrellas.

Los experimentos realizados por Franco Rasetti en 1929, consistentes en estudiar el espectro rotacional de la molécula de nitrógeno, acabaron cuestionando el modelo de Rutherford. El descubrimiento del neutrón, realizado en 1932 por James Chadwick, permitió explicar estos resultados mediante un modelo en el que el núcleo está formado por protones y neutrones. Con esto quedó despejado el camino para nuevos avances tanto teóricos como experimentales. En 1933 Enrico Fermi publica una teoría que explica la desintegración beta. En 1934 Irène y Frederic Joliot-Curie crean el primer elemento radiactivo artificial bombardeando aluminio con núcleos de helio acelerados en un ciclotrón. Mark Oliphant descubre el núcleo de ^3He y el tritio (isótopo del hidrógeno). Hideki Yukawa propone en 1935 un modelo para describir la fuerza que mantiene unidos a los nucleones (protones y neutrones) mediante el intercambio de mesones. En 1939 Hans Bethe explica los procesos de fusión estelar, los llamados ciclos protón-protón (que se da en el Sol) y CNO (carbono-nitrógeno-oxígeno, ver capítulo 2, apartado 5). En ese mismo año Lise Meitner, Otto Hahn y Fritz Strassman descubren la fisión del uranio, lo que permite a Enrico Fermi realizar la primera reacción nuclear en cadena sostenida en 1942. Estos acontecimientos se desarrollan con más detalle en el capítulo 6.

Después de la Segunda Guerra Mundial los campos de la física nuclear en general y de la fusión nuclear en particular continuaron su extraordinario desarrollo. Los avances civiles en estos campos fueron impresionantes. En 1946 Fred Hoyle desarrolla el concepto avanzado por Eddington de la nucleosíntesis estelar. Junto con William Fowler, Margaret Burbidge y Geoffrey Burbidge sistematiza el campo de la nucleosíntesis. En 1950 María Goeppert-Mayer y Hans Jensen publican el modelo nuclear de capas. Un año más tarde,

2 Actualmente denominamos “isótopos” a los miembros de cada una de las familias de átomos que, teniendo el mismo número atómico, tienen diferente número másico y, por tanto distinta masa. A lo largo del libro se indicarán con su símbolo químico y su número másico en la esquina superior izquierda

Edwin Salpeter propone el proceso triple alfa, mediante el cual las estrellas queman helio y producen carbono (ver capítulo 2, apartado 5). En ese mismo año, Lewis Spitzer introduce el concepto de stellarator; un dispositivo capaz de confinar plasmas mediante campos magnéticos. Dentro de las aplicaciones militares, en 1952 Stanislaw Ulam y Edward Teller en EE. UU. y posteriormente Andréi Sájarov en la URSS desarrollaron las bombas termonucleares (también conocidas como “de hidrógeno”). Finalmente, Lev Artsimovich presenta otro concepto de confinamiento en 1965, el tokamak.

El creciente número de aceleradores de partículas permite descubrir un particular “zoo” de partículas subatómicas. Su cantidad y variedad fue desconcertante hasta que en 1961 Murray Gell-Mann y Yuval Ne’eman desarrollaron de forma paralela un esquema de clasificación de estas partículas. Este esquema culminaría con la propuesta de la existencia de unas partículas subnucleares llamadas quarks (hecha independientemente por Gell-Mann y George Zweig). No es posible, ni forma parte del propósito de este libro, describir todos los avances posteriores en física nuclear y física de altas energías. Como colofón diremos que uno de los resultados más importantes de todos estos experimentos y modelos teóricos ha sido el llamado “modelo estándar”. Este modelo, aunque incompleto, explica exitosamente las interacciones electromagnética, nuclear débil y nuclear fuerte y clasifica las partículas subatómicas conocidas. Según el modelo estándar existen seis quarks (*up, down, charm, strange, top, bottom*) y seis leptones (electrón, muón, tauón, neutrino del electrón, neutrino del muón, neutrino del tauón) junto con sus respectivas antipartículas, todos ellos fermiones (con espín semientero). Las interacciones entre partículas tienen lugar mediante el intercambio de otro tipo de partículas de espín entero denominadas bosones gauge: ocho gluones (interacción fuerte), W^+ , W^- , Z (interacción débil) y el fotón (interacción electromagnética). Por último, el bosón de Higgs confiere masa a las anteriores partículas, exceptuando al fotón y a los gluones. En la figura 1.1 se presenta un esquema de las partículas subatómicas que constituyen el modelo estándar.

Modelo estándar de partículas elementales		I	II	III		
		$\approx 2,4 \text{ MeV}/c^2$ 2/3 1/2 u up	$\approx 1,275 \text{ GeV}/c^2$ 2/3 1/2 c charm	$\approx 172,44 \text{ GeV}/c^2$ 2/3 1/2 t top	0 0 1 g gluon	$\approx 125,09 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 0 H higgs
Masa	—	$\approx 4,8 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2 d down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ -1/3 1/2 s strange	$\approx 4,18 \text{ GeV}/c^2$ -1/3 1/2 b bottom	0 1 1 γ fotón	
Carga	—	$\approx 0,511 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2 e electrón	$\approx 105,67 \text{ MeV}/c^2$ -1 1/2 μ muón	$\approx 1,7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 1/2 τ tauón	0 1 1 Z bosón z	
Spin	—	$\approx 2,2 \text{ eV}/c^2$ 0 1/2 ν_e neutrino electrónico	$< 1,7 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2 ν_μ neutrino muónico	$< 15,5 \text{ MeV}/c^2$ 0 1/2 ν_τ neutrino tauónico	$\approx 80,39 \text{ MeV}/c^2$ 1 1 W bosón w	
Quarks						
Leptones						
Bosones de Gauge						
Bosones escalares						

Figura 1.1 Partículas indivisibles que conforman la materia en base al modelo estándar de la física

3. EL NÚCLEO ATÓMICO

Como se ha avanzado en el anterior apartado, el núcleo atómico está formado por protones y neutrones, también llamados conjuntamente nucleones. Conviene tener en cuenta que estos nucleones no son estáticos, como las ilustraciones de los núcleos atómicos dan a entender. Protones y neutrones están en movimiento con energías bien definidas (predichas por el modelo de capas nuclear). La interacción fuerte, que es atractiva, es mucho más intensa que la electromagnética, ésta repulsiva, lo que confina a los nucleones en el volumen nuclear. Para hacernos una idea del tamaño del núcleo atómico, diremos que el radio nuclear (suponiendo el núcleo esférico) varía entre uno y diez femtómetros³. Para hacernos una idea, si ponemos unos diez mil millones de núcleos en fila, ésta tendría una longitud parecida al espesor de un pelo. Así mismo, los nucleones son partículas compuestas por tres quarks. El protón está compuesto por un quark *down* y dos quark *up*, mientras que el neutrón está compuesto por dos quark *down* y un quark *up*. Para que el lector se haga una idea de la masa del protón⁴, cuatrocientos cuarenta cuatrillones de protones pesan lo mismo que el *Jabulani*, balón oficial del Mundial de

³ $1 \text{ fm} = 0,000\,000\,000\,000\,001 \text{ m}$

⁴ La masa del protón es $m_p = 938,272\,081\,3 \text{ MeV}/c^2$, aprox. $0,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,000\,001 \text{ kg}$

Fútbol Sudáfrica 2010. El neutrón es ligeramente más pesado⁵. Este hecho es fundamental para que el universo exista tal y como lo conocemos: implica que el neutrón es inestable (puede desintegrarse convirtiéndose en un protón), mientras que el protón y, por ende, el hidrógeno es estable y puede existir en grandes cantidades durante un periodo de tiempo indefinido. Gracias a esto, el hidrógeno pudo originar otros elementos (helio, litio...) en los primeros instantes del universo y también es el combustible de estrellas como el Sol. Es un buen momento para hablar sobre los diferentes órdenes de magnitud involucrados en la física nuclear de fusión. Esta disciplina abarca dimensiones tan pequeñas como los nucleones y tan grandes como una estrella gigante roja.

Radio de una gigante roja (Arturo)	$10^{10} m = 10\,000\,000\,000\,m$
Radio del Sol	$7,0 \cdot 10^{10} m = 700\,000\,000\,m$
Radio de la Tierra	$6,371 \cdot 10^6 m = 6\,371\,000\,m$
Edificio del ITER (ver capítulo 3)	120 m largo x 80 m ancho
Edificio del NIF (ver capítulo 4)	170 m largo x 100 m ancho
Radio del plasma en ITER	6,2 m
Radio de una cápsula de NIF	1 mm = 0,001 m
Radio de Van der Waals de un átomo de ^{12}C	$170\,pm = 0,000\,000\,000\,17\,m$
Radio de un núcleo de ^{12}C	$3\,fm = 0,000\,000\,000\,000\,003\,m$
Radio de un nucleón	$0,9\,fm = 0,000\,000\,000\,000\,000\,9\,m$

Como se puede observar, la fusión a escala estelar (confinamiento gravitatorio) implica magnitudes del orden de millones de kilómetros. Hay que tener en cuenta que las reacciones de fusión sólo tienen lugar en el núcleo de la estrella,

Figura 1.2 Tabla con las dimensiones de los objetos abarcados por la física nuclear

5 El neutrón tiene una masa $m_n = 939,565\,413\,3\,MeV/c^2$

donde se alcanzan las condiciones necesarias de temperatura y densidad. En el caso del Sol el radio del núcleo es el 20% del radio total, lo que no afecta al orden de magnitud indicado.

Por último, no hay que olvidar que la fusión nuclear es un proceso que involucra a núcleos atómicos ligeros y nucleones. Para que ésta tenga lugar, los núcleos deben aproximarse a distancias cercanas a su propio radio para que la interacción fuerte pueda actuar. El orden de magnitud del que hablamos es del fermi o femtómetro.

4. ESTABILIDAD Y DESINTEGRACIONES NUCLEARES

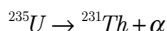
El núcleo atómico está formado por protones (partículas cargadas eléctricamente) y neutrones (partículas sin carga). El equilibrio en un núcleo se obtiene gracias a un balance entre la fuerza electromagnética (los protones se repelen entre sí) y la fuerza nuclear fuerte (los nucleones se atraen). La fuerza nuclear fuerte, atractiva, actúa a muy cortas distancias, mientras que la fuerza electromagnética, repulsiva entre protones, tiene un largo alcance. Por ello no existen núcleos estables formados únicamente por varios protones ya que la repulsión electromagnética es muy fuerte y actúa sobre todos ellos. Es necesario por tanto que haya un cierto número de neutrones sobre los que únicamente actúa la fuerza nuclear fuerte atractiva para estabilizar el núcleo. En núcleos ligeros el isótopo más estable suele tener el mismo número de protones y neutrones, por ejemplo el ^{12}C , 6 protones y 6 neutrones. A medida que el número de protones aumenta es necesaria una mayor proporción de neutrones para estabilizar el núcleo, por ejemplo, los isótopos estables del Plomo, ^{206}Pb , ^{207}Pb y ^{208}Pb tienen 82 protones y 124, 125 y 126 neutrones respectivamente.

En la naturaleza existen varios procesos por los que un núcleo inestable puede estabilizarse, transmutándose en la mayor parte de los casos en un elemento químico diferente.

Desintegración alfa

El núcleo emite una partícula alfa (^4He , 2 protones y 2 neutrones). Se da en

elementos pesados (número másico⁶ $A > 100$) y sus características principales (ley de Geiger-Nuttall) se pueden explicar mediante la mecánica cuántica.



Desintegración beta

Este proceso, mediado por la interacción nuclear débil, engloba diferentes mecanismos en los que un quark cambia de sabor (por ejemplo, cuando un quark *up* se convierte en un quark *down* dentro de un protón, éste se convierte en un neutrón). Esta desintegración tiene lugar en núcleos fuera del llamado “valle de estabilidad”, es decir, cuando tienen un exceso de protones o de neutrones.

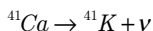
- **Desintegración β^- :** Un neutrón (aislado o confinado en el núcleo) se convierte en un protón emitiendo un electrón y un antineutrino.



- **Desintegración β^+ :** Un protón dentro de un núcleo se convierte en un neutrón emitiendo un positrón⁷ y un neutrino.



- **Captura electrónica:** Un protón que se encuentra en el núcleo captura un electrón del átomo, transformándose en un neutrón y emitiendo un neutrino.

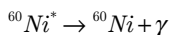


- **Desintegración doble β :** Dos procesos β se dan a la vez.



Desintegración gamma

Se da en núcleos excitados (con un exceso de energía), generalmente resultantes de algún otro tipo de proceso radiactivo. El núcleo emite un fotón, conservando su número atómico (Z) y su número másico (A).



⁶ El número másico de un isótopo lo constituye la suma de protones y neutrones que lo forman

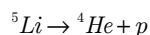
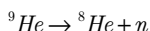
⁷ El positrón es la partícula de antimateria correspondiente al electrón, es decir, propiedades en general idénticas pero carga opuesta

Fisión espontánea

Un núcleo muy pesado se divide espontáneamente en dos núcleos más ligeros, emitiendo cierto número de neutrones.

Emisión de nucleones

Se da en núcleos excitados. Si la cantidad de energía es lo suficientemente grande como para vencer la atracción de la fuerza nuclear fuerte, el núcleo puede emitir un protón o un neutrón.

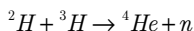


Todos estos procesos son estocásticos: dado un núcleo no podemos predecir si éste se va a desintegrar o no en los próximos cinco minutos, por ejemplo. Sólo podemos decir la probabilidad de que esto ocurra. Una medida más manejable es el periodo de semidesintegración. Dado un conjunto de átomos, el periodo de semidesintegración es el tiempo medio necesario para que el número de átomos que no haya sufrido un proceso radiactivo sea la mitad del inicial. El periodo de semidesintegración puede variar desde unos nanosegundos⁸ para elementos muy inestables hasta 10^{21} años⁹ para el caso de la desintegración doble beta.

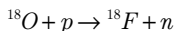
5. REACCIONES NUCLEARES

Definiremos una reacción nuclear como el proceso en el que dos nucleidos (o un nucleido y una partícula subatómica) interaccionan para formar uno o más nucleidos diferentes de los que iniciaron el proceso (si los nucleidos resultantes fueran iguales a los iniciales se hablaría de dispersión).

Ejemplos de reacciones nucleares son la de fusión de deuterio y tritio para dar lugar a un núcleo de helio y un neutrón:



O la de producción de ${}^{18}\text{F}$, trazador radiactivo usado en PET:



⁸ 1 ns = 0,000 000 001 s

⁹ 1 000 000 000 000 000 000 años

5.1 DEFECTO DE MASA

Al igual que las reacciones químicas, las reacciones nucleares pueden ser exotérmicas (generan energía) o endotérmicas (es necesario aportar energía neta para que se produzcan). Se puede saber si una reacción es exotérmica o endotérmica realizando un balance de masas y teniendo en cuenta la equivalencia masa-energía $E = mc^2$, donde E es la energía, m la masa y c la velocidad de la luz en el vacío. Si la masa de los nucleidos iniciales es mayor que la de los nucleidos finales, su diferencia (llamada Q de la reacción, dada en eV^{10}) será positiva y se producirá energía. En caso contrario, será necesario aportar energía (generalmente en forma de energía cinética de los nucleidos iniciales) para que la reacción se produzca. Por ejemplo, para la reacción de fusión nombrada anteriormente tenemos

$$Q = m(^2H)c^2 + m(^3H)c^2 - m(^4He)c^2 - m(^1n)c^2 = 17,59 MeV > 0$$

mientras que para la de producción de ^{18}F se tiene:

$$Q = m(^{18}O)c^2 + m(^1p)c^2 - m(^{18}F)c^2 - m(^1n)c^2 = -2,95 MeV < 0$$

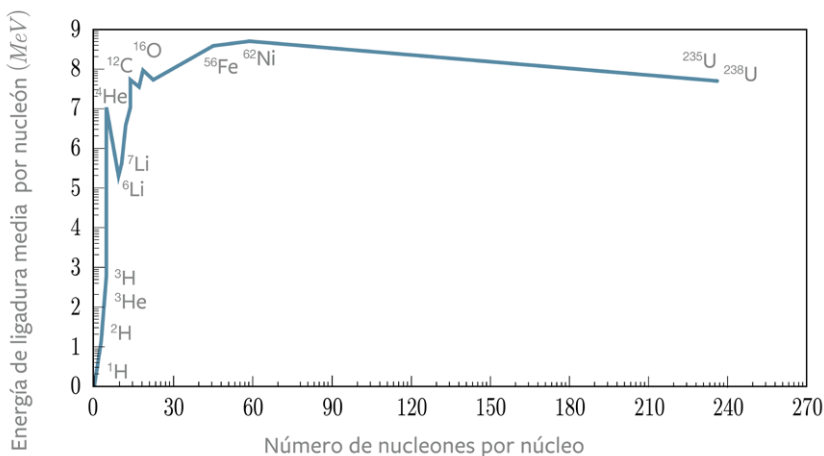


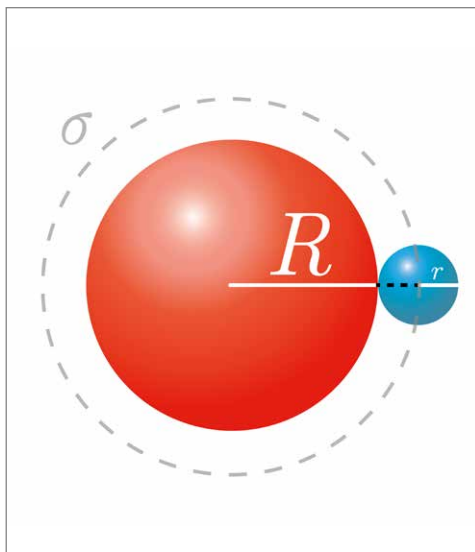
Figura 1.3 Energía de ligadura por nucleón

Así pues, el deuterio se fusionará con el tritio emitiendo energía (en forma de energía cinética del núcleo de helio y del neutrón) mientras que para producir

¹⁰ El electrón voltio (eV) es una unidad de medida de la energía correspondiente a $1,6022 \cdot 10^{-19} J$

^{18}F tenemos que acelerar protones en un ciclotrón para que tengan suficiente energía y se pueda producir la reacción.

De la misma manera que una Q negativa indica la energía que se necesita para producir la reacción, podemos hacer un cálculo parecido (masa del nucleido menos la suma de masas de los nucleones que lo forman) que nos da una idea de la cantidad de energía necesaria para separar al nucleido en sus partículas constituyentes: el llamado defecto de masa, responsable de la estabilidad nuclear. Cuanto mayor sea esta energía en valor absoluto (la llamada energía de ligadura), más estable es el nucleido. La figura 1.3 muestra la energía de ligadura dividida por el número de nucleones. En ella se puede observar la especial estabilidad¹¹ del ^4He y que el máximo de energía de ligadura por nucleón se da en el ^{62}Ni . Como se explicará en el siguiente capítulo, esta curva ayuda a entender qué elementos pueden producirse por fusión nuclear en las estrellas y cuáles no. Al igual que en el caso de las desintegraciones radiactivas, las reacciones nucleares también son estocásticas y se producen con una cierta probabilidad.



Podemos hacernos una idea de lo probable que es una reacción usando la llamada sección eficaz de reacción. Una imagen simplificada del concepto de sección eficaz se puede explicar usando bolas de billar. Imaginemos que lanzamos bolas de billar de radio r (partículas incidentes) contra otras de radio R (blancos). Un choque se producirá si y sólo si la distancia entre los centros de la partícula incidente y del blanco es menor que la suma de los radios.

$$d \leq r + R$$

Figura 1.4 La sección eficaz de dispersión de dos esferas rígidas de radios R y r es el área delimitada por la circunferencia de trazos, de radio $R+r$

¹¹ El ^4He (o partícula alfa) es, debido a que contiene dos protones y dos neutrones, un núcleo especialmente estable

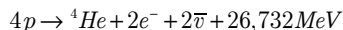
Como esto puede ocurrir para cualquier ángulo, esta distancia define un círculo de área σ con centro coincidente con el del blanco (ver figura 1.4).

$$\sigma = \pi(r + R)^2$$

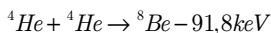
Todas las partículas incidentes cuyo centro esté contenido en este círculo colisionarán con el blanco. El resto de ellas no. Es necesario advertir al lector de que este ejemplo es una imagen muy ingenua del concepto de sección eficaz: los núcleos no son esferas rígidas y generalmente la interacción puede ocurrir a distancia, sin necesidad de que las “esferas se toquen” (imaginemos que las dos esferas están cargadas positivamente, la partícula incidente se desviaría de su trayectoria sin necesidad de “tocarw al blanco”). De hecho, las secciones eficaces suelen depender de variables como la energía de la partícula incidente o la temperatura del blanco, desvelando la estructura interna de estos. En definitiva, la sección eficaz es un parámetro que define la probabilidad de que una reacción nuclear tenga lugar entre un blanco y una partícula incidente. El orden de magnitud de las secciones eficaces usadas en tecnología nuclear suele ser del orden del barnio¹². Por ejemplo, la sección eficaz de fisión del ^{235}U varía entre 2 000 *barn* y 1 *barn* dependiendo de la energía del neutrón incidente, mientras que la sección eficaz de fusión deuterio-tritio tiene un valor máximo de unos pocos barnios que decae rápidamente al variar la energía de la partícula incidente.

5.2 LA FUSIÓN NUCLEAR

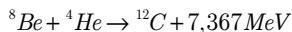
Llamamos fusión nuclear a la reacción que da lugar a un nucleido con un número másico mayor que el de cada uno de los nucleidos iniciales. Reacciones de fusión de interés astrofísico son el ciclo protón-protón, que tiene lugar en el Sol.



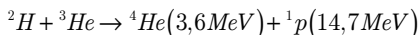
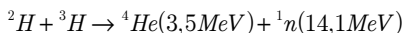
También se tienen el ciclo CNO, y el proceso triple alfa (ver capítulo 2, apartado 5):



¹² 1 *barn* = 10^{-24} cm^2 = 0,000 000 000 000 000 000 000 001 cm^2



De interés tecnológico para producción de energía son las reacciones de fusión de isótopos de hidrógeno, principalmente:



Todas estas reacciones son exotérmicas: la Q es positiva, se desprende energía. A pesar de esto, no es sencillo obtener esta energía. Aunque la reacción sea exotérmica, no basta con mezclar deuterio y tritio en un reactor para que ésta se produzca. Conviene aquí hacer una analogía con una reacción química. La combustión del fósforo de una cerilla al estar en contacto con el oxígeno del aire es una reacción exotérmica. Sin embargo, ésta no se produce espontáneamente. Es necesaria una energía de activación que en el caso de la cerilla es la producida por el rozamiento entre el fósforo y la parte rugosa de la caja. Una vez aportada esta energía la reacción se autosostiene y produce energía que podemos aprovechar. En el caso de la fusión nuclear ocurre algo similar. Para que la reacción se produzca, es necesario que los nucleones estén lo suficientemente cercanos ($\sim 1\text{ fm}$) como para que la interacción nuclear fuerte los una, desprendiendo energía. Sin embargo, para acercarlos tanto es necesario vencer la repulsión electromagnética, ya que los nucleidos están cargados positivamente. Para ello es necesario que tengan la energía cinética suficiente para acercarse y que se pueda producir la reacción. Esto es equivalente a decir que los nucleidos han de estar a temperaturas muy altas: del orden de $10\,000\,000\text{ }^\circ\text{C}$ en el núcleo del Sol, $150\,000\,000\text{ }^\circ\text{C}$ en tokamaks como ITER.

Es interesante indicar que las reacciones de fusión dejan de ser exotérmicas cuando el elemento resultante es más pesado que el ${}^{62}\text{Ni}$. Así pues, los procesos de nucleosíntesis en estrellas mediante reacciones de fusión sólo producen elementos relativamente ligeros, explicando la abundancia de elementos del entorno del ${}^{56}\text{Fe}$. Elementos más pesados se producen mediante otros procesos, como puede ser la captura neutrónica.

6. CONCLUSIONES

Después de un arduo proceso de investigación llevado a cabo en el pasado siglo se sabe que el núcleo de los átomos está formado por protones y neutrones. Ya que los protones están cargados positivamente, estos sufren entre sí una fuerza de repulsión electromagnética que se compensa gracias a la interacción nuclear fuerte, que es atractiva. Como esta interacción sólo actúa a distancias muy cortas (del orden de 1 fermi) mientras que la interacción electromagnética tiene alcance infinito, un nucleido que sólo contenga varios protones no puede existir. Es necesario cierto número de neutrones para que se pueda formar el nucleido.

Dependiendo del número de nucleones que conformen el nucleido éste puede ser estable o no. En caso de no ser estable se desintegrará mediante alguno de los procesos conocidos: desintegración alfa, desintegración beta, desintegración gamma, fisión espontánea o emisión de nucleones.

Cuando dos nucleidos se acercan lo suficiente pueden producirse reacciones nucleares. La fusión nuclear es un tipo de reacción nuclear en el que dos nucleidos (generalmente ligeros) se unen para formar un nucleido más pesado. Las reacciones de fusión que desprenden energía (reacciones exotérmicas) pueden utilizarse para producir energía útil siempre y cuando se controle el proceso de fusión. Para ello es necesario calentar la materia a temperaturas de cientos de millones de grados, obteniendo un plasma, y confinar este plasma en un volumen determinado para que las reacciones de fusión tengan lugar. Este es el objetivo de los proyectos actuales de fusión por confinamiento magnético y de fusión por confinamiento inercial.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Curso básico de ciencia y tecnología nuclear. Jóvenes Nucleares. Sociedad Nuclear Española. [Volver a página 7](#)
- [2] De Becquerel a Oppenheimer. Historia de la energía nuclear. Mariano Mataix. Senda Editorial S. A., 1988.
- [3] La bomba atómica: El factor humano en la Segunda Guerra Mundial. Natividad Carpintero. Ediciones Díaz de Santos, 2007
- [4] Física Nuclear. Unidad didáctica. U. N. E. D.
- [5] Fundamentals in Nuclear Physics. From Nuclear Structure to Cosmology. Jean-Louis Bas-devant, James Rich, Michel Spiro. Springer, 2004

BIBLIOGRAFÍA DE FIGURAS

- [1.1] Elaboración propia en base a: Own work by uploader, PBS NOVA [1], Fermilab, Office of Science, United States Department of Energy, Particle Data Group
Dominio público, https://commons.wikimedia.org/wiki/Standard_Model#/media/File:Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg
- [1.2] Elaboración propia
- [1.3] Elaboración propia en base a: Dominio público, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Binding_energy_curve_-_common_isotopes.svg
- [1.4] Elaboración propia

2 - INTRODUCCIÓN A LA FÍSICA NUCLEAR DE FUSIÓN II

Adriana Ortiz Gómez
Autora

Eduardo Oliva Gonzalo
Revisor

1. INTRODUCCIÓN

El presente capítulo comienza por exponer los conceptos fundamentales que permiten comprender los fenómenos cuánticos en los que se fundamenta el proceso de fusión nuclear. Se introduce el concepto de los estados cuánticos de un sistema, así como la interpretación de Copenhage, y finalmente se expone el concepto de efecto túnel como medio para conseguir la fusión nuclear.

El capítulo continúa definiendo, conceptual y matemáticamente, el concepto de tasa de reacción nuclear y expone la relación que guarda con el concepto de sección eficaz expuesto en el capítulo anterior.

Seguidamente, se define el concepto de plasma, denominado el cuarto estado de la materia. Este apartado expone las propiedades del estado plasmático de la materia y las diferencias que presenta con respecto a estados con interacciones de corto alcance, y al mismo tiempo describe brevemente las ramas de estudio existentes y los conceptos matemáticos aplicables.

A continuación, el capítulo describe el fenómeno de fusión nuclear en las estrellas y los procesos que intervienen en la síntesis nuclear estelar. De esta manera, se expone la fusión protón-protón, presente en estrellas como nuestro Sol, el ciclo CNO, presente en estrellas más masivas, y el proceso triple alfa, presente en estrellas con muy altas temperaturas internas.

Finalmente, el capítulo concluye con una introducción al proceso de generación de plasmas en condiciones de laboratorio, exponiendo brevemente el criterio de Lawson y describiendo las diferencias inherentes a los procesos de fusión por confinamiento inercial y magnético.

2. EL EFECTO TÚNEL

Para que el lector pueda comprender el fenómeno cuántico expuesto en este primer epígrafe es indispensable comenzar por un breve recordatorio de algunos conceptos básicos de la mecánica cuántica. En la misma, el estado de un sistema físico se describe mediante una función de las coordenadas generalizadas del sistema (q) y del tiempo (t), denominada función de onda, $\psi(q,t)$, que adopta valores complejos y cuyo módulo elevado al cuadrado, $|\psi(q,t)|^2$, define la densidad de probabilidad de las variables (q) en un instante dado (t). Así, por ejemplo, si dichas variables se reducen a la posición de una partícula ($q = \mathbf{r}$) entonces $|\psi(\mathbf{r},t)|^2$ es la densidad de probabilidad por unidad de volumen de encontrar la partícula en un punto e instante dados¹.

La descripción de un sistema cuántico adquiere así una naturaleza esencialmente probabilista, lo cual no impide la existencia de ciertos estados del sistema donde algunas magnitudes (como la energía) toman valores unívocos. Aun así, ocurre que estos valores propios determinados no son simultáneamente factibles para ciertas parejas de magnitudes. Un caso paradigmático es el de la posición y el momento, de tal manera que la trayectoria clásica de una partícula deja por completo de tener sentido físico. Las relaciones de indeterminación que rigen entre dichas parejas de magnitudes físicas, es el denominado principio de incertidumbre (enunciado por Heisenberg en 1927), que es uno de los principios fundamentales de la mecánica cuántica.

La evolución en el tiempo de la función de onda es descrita por la ecuación de onda (propuesta por Schrödinger en 1926). Dicha ecuación permite calcular la evolución de un sistema cuántico a partir de su estado en un instante dado. Se la denomina ecuación de onda porque su estructura formal, en la medida en que recoge los aspectos ondulatorios manifestados por estos sistemas, está relacionada con las ecuaciones de onda de la física clásica. El hecho de que dicha ecuación sea lineal en ψ tiene enorme trascendencia, ya que posibilita que los estados reales puedan ser la suma de otros, hecho conocido como principio de superposición.

El formalismo matemático de la mecánica cuántica ha sido objeto de debates, especulando sobre el significado físico de la función ψ . Por un lado, la función ψ admite la descripción de una onda, es decir, el estado de una partícula material (por ejemplo: un electrón) podría contemplarse como un conjunto de ondas superpuestas; si bien, complementariamente, determinados hechos

¹ En general, (q) incluye otras variables de estado, no necesariamente continuas, como por ejemplo el espín de la partícula



experimentales manifiestan un comportamiento corpuscular de fenómenos clásicamente ondulatorios, como por ejemplo, el campo electromagnético. Así pues, donde la física clásica describe comportamientos ondulatorios, la física cuántica agrega aspectos corpusculares (como en el caso de la luz²) y viceversa (para las partículas materiales). Se habla por ello de la dualidad onda-corpúsculo como un atributo esencial de los sistemas mecano-cuánticos. En un intento de conciliación de los hechos experimentales, Niels Bohr formuló en la interpretación de Copenhague lo que se conoce como el “principio de complementariedad” que establece que ambas descripciones, la ondulatoria y la corpuscular, son necesarias para comprender el mundo cuántico. Bohr también señaló en esa conferencia que, mientras en la física clásica un sistema de partículas evoluciona independientemente de que sean observadas o no, en la física cuántica el observador interactúa con lo observado en tal medida que su existencia independiente queda fuera del alcance de las observaciones experimentales. La función de onda de Schrödinger queda así reducida a la categoría de un mero formalismo, útil para la predicción probabilística de los resultados de dichas observaciones dentro un cierto espectro de valores propios.

De la naturaleza ondulatoria de la materia se derivan diversas consecuencias, siendo una de ellas el denominado efecto túnel. Dentro de un pozo de potencial finito ($V(r) = V_0$ fuera del intervalo $r = 0, r = L$) si la energía total de la partícula, E , es inferior al potencial, V_0 , la física clásica impide que la partícula pueda salir de dicha región, ya que al ser $E = V + E_c$, siendo E_c la energía cinética, ésta tendría que ser negativa, lo cual es imposible. Sin embargo, la física cuántica encuentra una cierta probabilidad de encontrar a la partícula fuera de los límites establecidos.

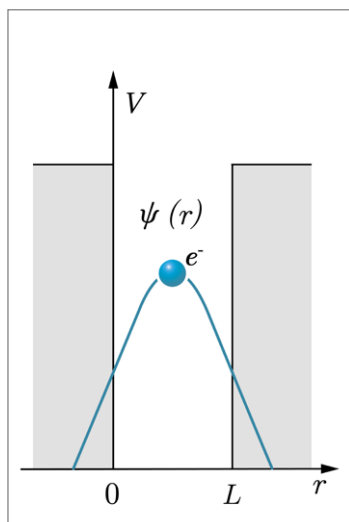


Figura 2.1 Representación de la función de onda en un pozo de potencial

² Por ejemplo, el efecto fotoeléctrico (cuya explicación le valió a Einstein el premio Nobel en 1922) evidencia que la propagación de la luz se comporta, bajo determinadas circunstancias, como un sistema de corpúsculos o fotones



Es decir, la función de onda no se anula en los límites del pozo sino que penetra fuera cierta distancia.

El ejemplo anterior, ilustrado en la figura 2.1, representa una función de onda confinada entre dos “muros” de potencial de anchura infinita. Ahora bien, si las paredes del “muro” tuvieran una anchura suficientemente reducida (como se ilustra en la figura 2.2), una parte significativa de la función de onda podría llegar más allá de dichas paredes. Esto implica una cierta probabilidad de que la partícula atravesase la barrera de potencial, sin aportarle la energía adicional que la física clásica exigiría para superarla³. Este fenómeno es conocido como efecto túnel.

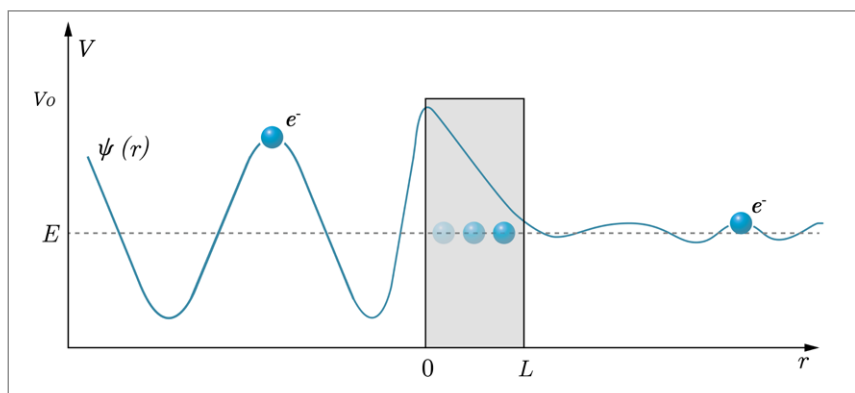


Figura 2.2 Representación de la función de onda ante una barrera de potencial

Con este bagaje de conceptos se pueden interpretar adecuadamente algunos aspectos fundamentales de la fusión nuclear. En ésta, las partículas involucradas deben superar la repulsión eléctrica (denominada barrera coulombiana), con objeto de acercarse lo suficiente, para que la fuerza nuclear fuerte atractiva (de muy corto alcance) permita fusionar las partículas (ver capítulo 1, apartado 4). De esta manera, el potencial de interacción entre dos partículas o núcleos que se aproximan tiene la forma de la figura 2.3.

El efecto túnel juega un papel esencial en la fusión nuclear ya que, en su ausencia, las temperaturas de fusión que serían necesarias para superar la barrera de coulombiana serían extremadamente altas. De esta manera, algunas partículas que tienen energías por debajo de esta barrera pueden penetrarla por efecto túnel, permitiendo que el proceso se ejecute a temperaturas más

³ Una parte de la onda “se refleja” en la barrera y otra “se transmite” a través de la misma; ambos casos ocurren con probabilidades perfectamente predecibles



bajas que las que se requerirían a las presiones alcanzables en el laboratorio.

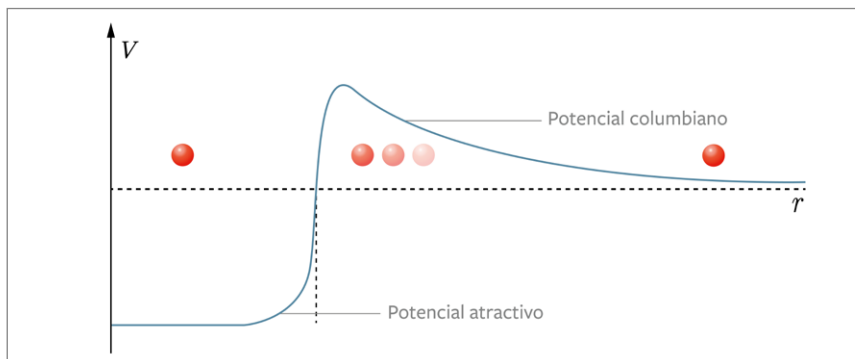


Figura 2.3 Penetración por efecto túnel de la barrera coulombiana existente entre dos partículas cargadas

La energía cinética de las partículas interactuantes está determinada por una distribución de Maxwell-Boltzmann de sus velocidades. Dicha distribución establece que los valores típicos de su energía cinética, incluso a temperaturas muy elevadas, son muy inferiores a la barrera coulombiana; por ello, sólo aquellas partículas que tengan las mayores energías en la distribución maxwelliana serían capaces de superar la barrera coulombiana. Para altas energías el valor de la distribución maxwelliana decrece con la energía (es decir, hay cada vez menos partículas con esas energías elevadas), sin embargo, la probabilidad de atravesar la barrera (sección eficaz de la reacción) por efecto túnel aumenta con la energía de la partícula. Como resultado de ambos efectos contrapuestos existe un rango de energías de máxima eficiencia para la producción de reacciones de fusión, denominado pico de penetración de la barrera coulombiana, también conocido como pico de Gamow⁴.

Este fenómeno se observa en el Sol, donde la energía que poseen los núcleos de hidrógeno (protones) no es suficiente para superar la barrera de potencial que produce la repulsión electromagnética entre ellos. Si bien, gracias al efecto túnel, existe una cierta probabilidad de que algunos protones la sobrepasen, produciéndose la fusión de los mismos y liberando energía.

Aunque la probabilidad de que se produzca el efecto túnel es muy pequeña, la enorme cantidad de partículas que componen el Sol hace que este efecto se produzca constantemente.

⁴ Las tasas de fusión son proporcionales a este factor



Cabe destacar que el pico de Gamow es muy sensible a la temperatura. Esto explica por qué cuanto más masiva es una estrella (como una supergigante azul), más rápido se consume, ya que su temperatura y por lo tanto la energía cinética de los nucleones es mayor y, en consecuencia, la probabilidad del efecto túnel también.

3. TASA DE REACCIÓN NUCLEAR

Los conceptos discutidos en el capítulo 1 involucran una física a nivel microscópico; si bien el siguiente paso para calcular la energía producida en un reactor de fusión requiere realizar un análisis de los procesos físicos a nivel macroscópico.

Esto se consigue mediante la introducción del concepto de tasa de reacción, que está directamente relacionado con el concepto de sección eficaz de reacción definido anteriormente (capítulo 1, apartado 5) que, como se ha mencionado, está relacionado con la probabilidad de que ocurra una reacción. La tasa de reacción se define como el número de colisiones o reacciones de fusión por unidad de volumen y por unidad de tiempo. Una vez conocido este valor el cálculo de la potencia de fusión producida por unidad de volumen es inmediato. Se puede deducir que la tasa de reacción viene dada por la expresión siguiente:

$$R = n_1 \cdot n_2 \cdot \sigma \cdot v$$

Donde:

R es la tasa de reacción en $\frac{1}{\text{cm}^3 \cdot \text{s}}$

n_1 es la densidad de partículas incidentes en $\frac{1}{\text{cm}^3}$

n_2 es la densidad de partículas en el blanco en $\frac{1}{\text{cm}^3}$

σ es la sección eficaz de reacción de fusión en cm^2

v es la velocidad relativa de las partículas en $\frac{\text{cm}}{\text{s}}$



Como se ha dicho, a partir de las tasas de reacción es posible calcular la densidad de potencia generada mediante reacciones de fusión, esto es, la energía liberada por fusión por unidad de volumen y por unidad de tiempo:

$$P = R \cdot Q$$

Donde:

P es la densidad de potencia en $\frac{MeV}{cm^3 \cdot s}$

R es la tasa de reacción de fusión en $\frac{1}{cm^3 \cdot s}$

Q es la energía neta liberada por cada reacción de fusión⁵ en MeV

La expresión de la tasa de reacción indicada anteriormente sólo es válida para una velocidad conocida y constante de las partículas reaccionantes. No obstante, las partículas blanco e incidentes tienen ambas una distribución aleatoria de velocidad, ya que no todas las partículas blanco están inmóviles y no todas las partículas incidentes se mueven con la misma velocidad (v). La tasa de reacción generalizada para incluir múltiples velocidades se basa en el concepto de “parámetro de tasa de reacción”: $\langle \sigma v \rangle$, el cual expresa el promedio calculado con una función de distribución dada de las velocidades relativas de las partículas interactuantes. De esta manera, la tasa de reacción generalizada se puede expresar como:

$$R = n_1 \cdot n_2 \cdot \langle \sigma v \rangle$$

Los valores de $\langle \sigma v \rangle$ se encuentran formulados mediante expresiones del tipo:

$$\langle \sigma v \rangle = a \cdot T^{-2/3} \cdot e^{\frac{-b}{T^{1/3}}}$$

En la figura 2.4 se muestran representadas gráficamente las tasas de reacción para las reacciones Deuterio-Tritio (D - T), Deuterio-Deuterio (D - D) y Deuterio-Helio-3 (D - ^3He).

Se observa que para la reacción D - T existe un valor máximo de aproximadamente $9 \cdot 10^{-22} m^3/s$ para una temperatura de en torno a $70 keV^6$ (812,7 millones de

⁵ La energía neta liberada por cada reacción de fusión se puede deducir a partir del defecto de masa de la reacción (ver capítulo 1, apartado 5.1)

⁶ 1 eV equivale a una temperatura de 11 610 K



K). Sin embargo sabemos que, para la reacción D - T, se tiene una temperatura de operación óptima del orden de 15 keV ($174,15$ millones de K), muy por debajo de la citada temperatura del máximo de 70 keV . Esto es debido a que a mayores temperaturas el plasma pierde energía principalmente por radiación de frenado o *bremssstrahlung*, lo que afecta al proceso en su conjunto.

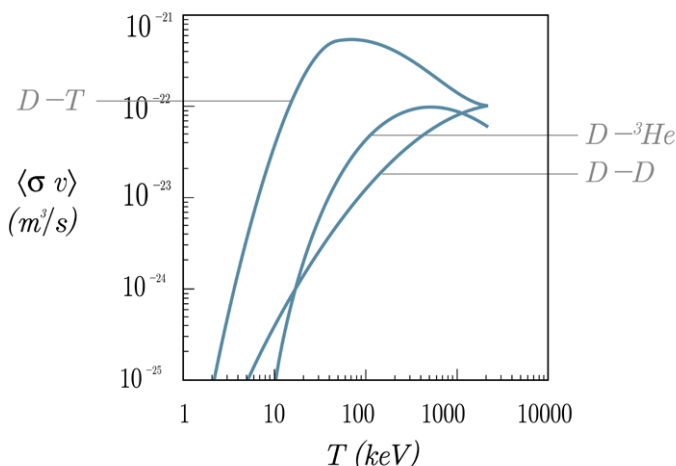


Figura 2.4 Parámetro de tasa de reacción de fusión para isótopos ligeros, $\langle \sigma v \rangle$ (m^3/s) en función de la temperatura, T (keV)

4. EL PLASMA, CUARTO ESTADO DE LA MATERIA

Como se ha visto, sólo cuando las energías relativas de los núcleos son de varias decenas de keV son apreciables las tasas de fusión nuclear. A las elevadas temperaturas necesarias para alcanzar las condiciones de fusión nuclear, la materia se encuentra en estado de plasma.

Como se ha introducido en el apartado 5.2 del capítulo 1, el estado de plasma implica la ionización parcial o completa de un material, debido a un calentamiento o a una fotoionización, de tal manera que está formado por iones y electrones, esto es, un estado fluido similar al estado gaseoso constituido por partículas libres cargadas eléctricamente.

El plasma presenta características propias que no se dan en los sólidos,



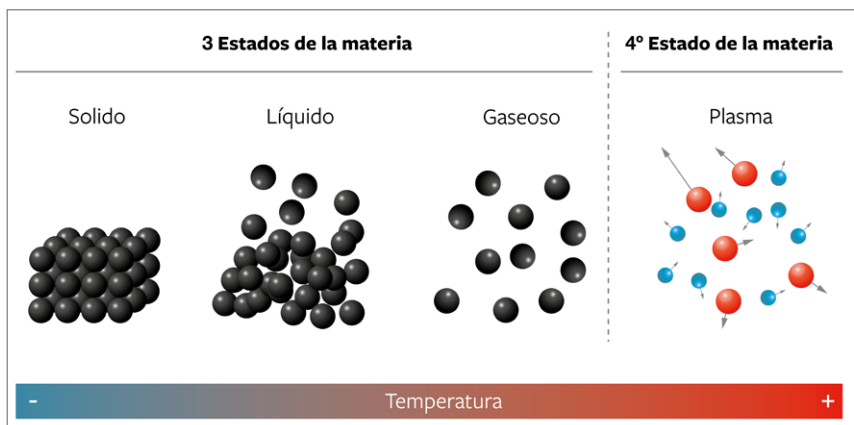


Figura 2.5 Estados de la materia: sólido, líquido, gas y plasma

líquidos o gases, por lo que es considerado un estado de agregación diferente, conocido como el cuarto estado de la materia. Los plasmas presentan muy buena conductividad eléctrica y respuestas colectivas de largo alcance ante perturbaciones. Por su alta conductividad, el interior de un plasma está apantallado frente a campos eléctricos constantes, pero no frente a campos magnéticos constantes, que pueden penetrar en el plasma permitiendo mantenerlo confinado. Como los gases, el plasma no tiene una forma o volumen definido, a no ser que esté encerrado en un contenedor; pero, a diferencia de los gases (en los que no existen efectos colectivos importantes), el plasma puede formar estructuras complejas (como filamentos o capas) bajo la influencia de un campo magnético.

El plasma es el estado más abundante en el Universo visible. Es, además, un estado que podemos encontrar a nuestro alrededor como, por ejemplo, en la ionosfera, en el gas contenido en un tubo fluorescente, en un relámpago o en un arco de soldadura.

Este estado es producido a altas temperaturas, para las cuales se exceden los potenciales de ionización de la materia. Tal como se ha indicado, para conseguir reacciones de fusión nuclear son necesarias temperaturas del orden de keV (decenas de millones de K), muy elevadas frente al potencial de ionización del hidrógeno, de $13,6\text{ eV}$, o del plomo, de 171 eV para llegar al décimo electrón. En el caso de la reacción D - T, como se ha visto en la figura 2.5, la energía



requerida para iniciar la reacción de fusión es del orden de decenas de keV (centenares de millones de K) que excede los potenciales de ionización en un factor de más de 1000. De ello se deduce que un combustible de D - T es básicamente un gas completamente ionizado, es decir, un plasma. La ionización puede ser inducida por distintos medios como la aplicación de un fuerte campo electromagnético mediante un láser o un generador de microondas (los métodos para calentar el plasma se exponen en los capítulos 3 y 4).

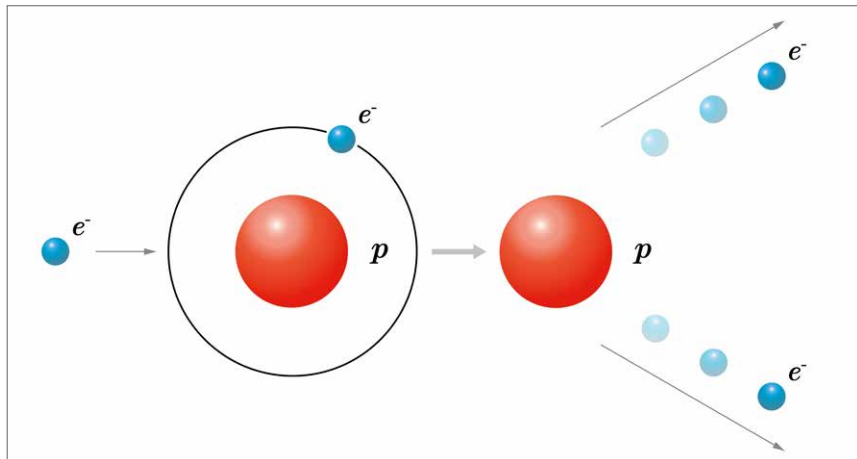


Figura 2.6 Proceso de ionización colisional de la materia

Para describir un plasma se definen tres parámetros fundamentales:

- Una longitud característica (conocida como longitud de Debye, λ_D)
- Una frecuencia característica (conocida como frecuencia de plasma, ω_p)
- Un parámetro colisional característico (conocido como parámetro de plasma, Λ)

El comportamiento del plasma varía en función de los valores de estos tres parámetros. En concreto, se considera que un plasma es ideal cuando presenta:



- Un valor pequeño de λ_D y grande de ω_p (que garantiza un efectivo apantallamiento frente a campos eléctricos).
- Un valor elevado de Λ (que garantiza que los efectos colectivos de largo alcance son mucho más importantes que las colisiones coulombianas de corto alcance).

Cualquier partícula cargada dentro de un plasma atrae a otras partículas de carga opuesta y repele a aquellas que tienen el mismo signo de carga eléctrica. Se crea entonces una nube de carga opuesta alrededor de cada partícula cargada. Esta nube produce un “auto-blindaje” de la propia partícula respecto al resto de las partículas del plasma, y el campo electrostático coulombiano resultante disminuye exponencialmente con la distancia (efecto conocido como autoapantallamiento o autoblandaje de Debye). Por tanto, en un plasma neutro, si se introduce una partícula cargada eléctricamente, el plasma se reordenará (efecto colectivo), de tal manera que para una distancia $r > \lambda_D$, la carga se encuentra apantallada y no se detecta su efecto (autoblandaje frente al resto de partículas). En estas condiciones, el potencial creado en torno a esta carga disminuye muy rápidamente, a diferencia de una carga aislada en el vacío. La longitud de Debye es, por tanto, el parámetro fundamental de cualquier plasma ya que define la distancia de auto-apantallamiento en el plasma del campo electrostático de cada partícula y sirve como escala espacial característica de la separación de carga, así como para definir la condición espacial de cuasi-neutralidad. Cabe destacar que esta longitud se puede expresar como:

$$\lambda_D(m) = 7,437 \sqrt{\frac{T(eV)}{n_0(cm^{-3})}}$$

Siendo n_0 la densidad media de electrones y protones en el plasma.



5. LA FUSIÓN EN LAS ESTRELLAS

Nuestro Sol genera energía gracias a la reacción de fusión más elemental posible: la reacción protón-protón. Debido a que la temperatura en su centro es de en torno a $1,3 \text{ KeV}$ ($1,57 \cdot 10^7 \text{ K}$) la probabilidad de este proceso es muy pequeña, ya que la sección eficaz de esta reacción es muy reducida ($\sigma_{p-p} \sim 10^{-9} \text{ barn}$, para 1 keV). No obstante, debido al gran número de protones presentes se obtiene un número muy elevado de reacciones ($\sim 10^{38} \text{ reacciones/s}$).

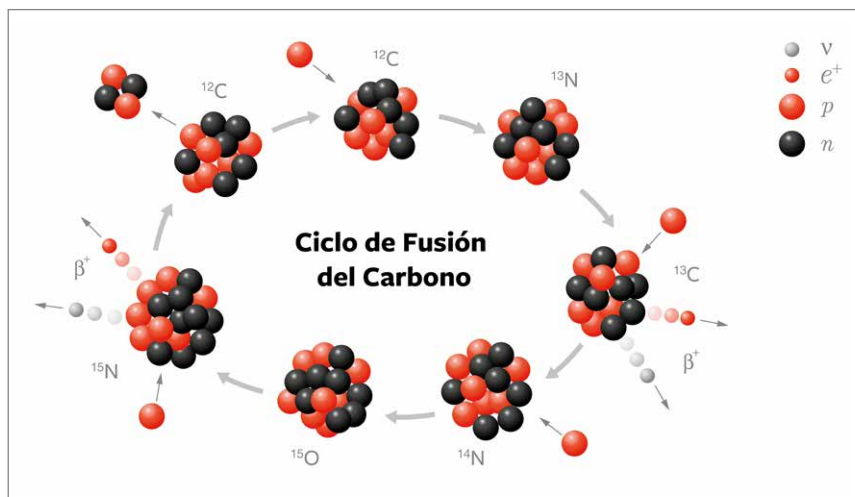


Figura 2.7 Ciclo CNO propuesto para la generación de energía en las estrellas

Es decir, el Sol pierde aproximadamente 10^{19} kg de masa al año. Con esta tasa de quemado se puede deducir fácilmente la vida del Sol en, aproximadamente, $8 \cdot 10^9$ años⁷.

De esta manera la energía de las estrellas proviene de procesos de fusión nuclear; pero, dependiendo de la edad y la masa de la estrella, se puede producir por diversos procesos:

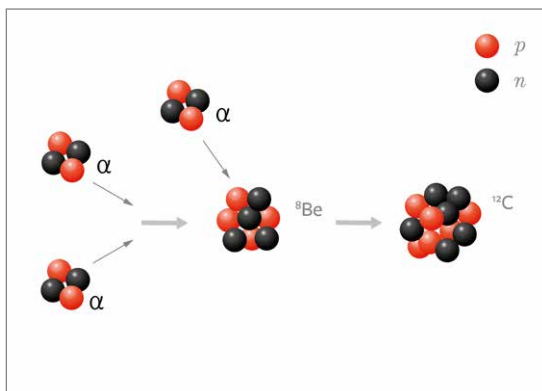
- En las estrellas como el Sol que tienen la temperatura interna inferior a 15 millones de Kelvin, el proceso dominante es la fusión protón-protón.

⁷ Cabe destacar que si el Sol, en lugar de producir reacciones de fusión, se basara en reacciones químicas (como, por ejemplo, la combustión del carbón), su vida sería de tan sólo unos 3000 años para producir la misma cantidad de energía por unidad de tiempo



- En las estrellas más masivas que pueden alcanzar temperaturas más altas, el proceso dominante es el ciclo CNO. Al igual que el proceso protón-protón, el ciclo CNO fusiona cuatro protones en un núcleo de helio, sólo que en este proceso el carbono actúa como un catalizador (es decir reaparece al final del proceso). Este proceso consiste en la captura de protones y sucesivas desintegraciones beta, como se muestra en la figura 2.7. El ciclo CNO comienza con la captura de un protón por un núcleo de ^{12}C y termina con un núcleo de ^{16}O que emite una partícula alfa convirtiéndose, de nuevo, en ^{12}C .
- En las estrellas que tienen temperaturas internas superiores a 100 millones de Kelvin (como puede suceder en la última fase de las gigantes rojas y las supergigantes rojas) se produce el denominado proceso triple alfa, en el que se produce la fusión del helio para formar berilio, que es inestable, y luego carbono.

Los elementos posteriores al hierro en la tabla periódica no se pueden formar en los procesos de fusión nuclear de las estrellas ya que, hasta el hierro, la fusión produce energía, es decir, el proceso es favorable energéticamente (exotérmico) y por lo tanto puede continuar de manera autoinducida. Sin embargo, dado que el hierro está en el pico de la curva de energía de enlace (ver figura 1.3 del capítulo 1), la fusión de los elementos por encima del hierro deja de ser energéticamente favorable (es decir, es una reacción endotérmica).



Por ello, otra clase de reacciones nucleares es responsable de la síntesis nuclear de elementos más pesados que el hierro, conocidos como proceso-s, proceso-r y proceso-p, este último de menor importancia. Estos procesos juegan un papel fundamental en la síntesis nuclear estelar.

Figura 2.8 Proceso triple alfa



Dado un flujo de neutrones en una estrella masiva, los isótopos más pesados pueden ser producidos por captura de neutrones, de tal manera que aumenta su número másico. Los isótopos producidos de este modo son a menudo inestables, y generalmente decaen mediante desintegración beta, aumentando el número atómico. Si el flujo de neutrones no es excesivamente elevado, los núcleos resultantes de la absorción de un neutrón que sean inestables tienen tiempo de decaer por emisión beta a un núcleo estable. Estos núcleos pueden de nuevo absorber un neutrón y decaer (si no fueran estables), aumentando en cada paso el número másico en una unidad. Este proceso de captura neutrónica es denominado proceso-s, por la captura lenta (del inglés *slow*) de neutrones y sólo puede producir núcleos hasta el ^{209}Bi . El proceso-s se da en estrellas más masivas que el Sol, principalmente en la fase de quemado de helio de las gigantes rojas, y puede alargarse miles de millones de años.

El grado según el cual el proceso-s hace aumentar el número atómico de los elementos a lo largo de la tabla periódica depende esencialmente de la capacidad de la estrella para producir neutrones y por la cantidad inicial de hierro presente, ya que éste es el material de partida necesario a partir de la cual se sintetizan estos nuevos elementos.

Cuando el flujo de neutrones es muy elevado (por ejemplo en una supernova) los núcleos absorben varios neutrones antes de decaer por emisión beta a núcleos más estables. Este proceso se denomina proceso-r, por la captura rápida (del inglés *rapid*) de neutrones. Ciertos núcleos que no pueden producirse por procesos-s se producen gracias a este proceso, así como los núcleos más pesados que el ^{209}Bi .

Por último, el denominado proceso-p crea nuevos núcleos mediante la absorción de protones. La contribución de este proceso a la abundancia de nucleídos es bastante menos significativa que la de los dos procesos anteriores.

De esta manera la generación de elementos en el universo a través de la actividad de las estrellas varía en función del tamaño de la misma:

- En las estrellas con menos de ocho veces la masa del Sol, sólo se quema hidrógeno y helio porque la zona central de la estrella nunca alcanza la temperatura y densidad necesarias para iniciar otra fase de quemado. Una vez que el proceso de quemado de helio termina quedan diversas capas: hidrógeno en el exterior, helio en la capa media y un centro formado por el carbono y oxígeno producidos en el proceso triple alfa.



En ese momento, las capas exteriores salen despedidas creando una nebulosa planetaria y dejando una enana blanca detrás.

- En las estrellas ocho veces más masivas que el Sol, los procesos nucleares pueden continuar mucho más tiempo, hasta el quemado del silicio, dejando un centro de hierro. Cuando esta fase de quemado termina, la estrella no puede soportar su propio campo gravitatorio y las capas exteriores caen rápidamente hacia el interior de la estrella, colapsando su centro hasta densidades elevadísimas y generando una violenta onda de choque que produce la explosión característica de una supernova, la cual deja como remanente una estrella de neutrones⁸.
- Si la estrella inicial posee 30 o más veces la masa del Sol, la implosión anteriormente descrita acabará colapsando incluso la estructura interna. Así se alcanzan densidades tan elevadas que afectan a la curvatura del espacio-tiempo circundante de tal manera que ninguna⁹ partícula material, ni siquiera la luz, pueda escapar. Es lo que se conoce como agujero negro.

Por medio de estos procesos, los elementos recién creados en las estrellas se diseminan hacia el espacio en forma de gas y nubes de polvo, de las cuales nacen en el futuro nuevas generaciones de estrellas.

6. GENERACIÓN DE PLASMAS PARA OBTENCIÓN DE ENERGÍA

La obtención de energía a través de la fusión a escala comercial exige primero determinar las condiciones necesarias para conseguir la producción de energía por fusión de elementos ligeros (principalmente deuterio y tritio) de manera que el sistema sea rentable desde el punto de vista energético, es decir, para que exista ganancia de energía. Esta ganancia energética depende de que la energía necesaria para calentar y confinar el plasma sea menor que la energía liberada por las reacciones de fusión nuclear.

⁸ Las estrellas de neutrones son resultantes de la reacción entre protones y electrones, proceso en el que se produce además la emisión de neutrinos. La ley de conservación del momento angular determina que estos densísimos objetos, de reducido diámetro -del orden de una o dos decenas de kilómetros-, experimentan una elevada velocidad de rotación, generando intensos pulsos de radiación que se observan con una periodicidad fija, conocidas como “púlsares”

⁹ Teóricamente se postula la posibilidad de que los agujeros negros emitan radiación, la llamada radiación de Hawking



El requisito de cualquier reactor de fusión nuclear es proporcionar una temperatura suficientemente alta para producir las reacciones de fusión y garantizar un suficiente número de núcleos, es decir, una densidad de plasma suficientemente alta para asegurar una alta probabilidad de colisión de las partículas. Además, estas condiciones de temperatura y densidad se deben mantener un tiempo suficiente a fin de permitir que ocurran suficientes reacciones de fusión nuclear para obtener una ganancia neta de energía.

Esta idea se materializa a través del denominado “criterio de Lawson”, que establece el criterio de ignición mediante un simple balance de energía en el que aparecen como únicas variables la temperatura (T), el tiempo de confinamiento (τ) y la densidad (n).

- El criterio de ignición establece el valor mínimo de la temperatura para la que el sistema se encuentra en funcionamiento autosostenido. Es decir, cuando la potencia de calentamiento (debido a la deposición de energía de las partículas cargadas en el plasma) supera a las pérdidas de potencia (principalmente debidas a la radiación de *bremstrahlung*, debida a su vez a la deflexión de las trayectorias electrónicas en el campo coulombiano formado por los iones). Realizando este balance de energías se obtienen unas temperaturas de ignición del orden de:

$$\begin{array}{ll} \text{deuterio} - \text{tritio} & T_{\text{ignicion}} = 4,8 \text{ keV} \\ \text{deuterio} - \text{deuterio} & T_{\text{ignicion}} = 27 \text{ keV} \end{array}$$

- El tiempo de confinamiento en dispositivos de fusión nuclear se define como el tiempo que se mantiene el plasma a una temperatura por encima de la temperatura de ignición crítica. Para producir más energía de fusión que la invertida en calentar el plasma, el medio debe ser mantenido a esta temperatura durante un período de tiempo mínimo.

Incluso disponiendo de una temperatura suficientemente alta para superar la barrera coulombiana, debe mantenerse una densidad crítica de iones para que la probabilidad de colisión sea suficientemente alta y se consiga un rendimiento neto de energía de la reacción.

Por tanto, una vez se ha logrado la temperatura de ignición necesaria para la fusión nuclear, se debe mantener esa temperatura durante un tiempo de confinamiento suficientemente largo y con una densidad de iones



suficientemente alta para obtener una ganancia neta de energía.

El criterio de Lawson expresa este concepto como el producto de la densidad de iones y el tiempo de confinamiento que se cuantifica de la siguiente forma:

$$\text{deuterio-tritio} \quad n\tau \geq 2 \cdot 10^{14} \frac{\text{s}}{\text{cm}^3}$$

$$\text{deuterio-deuterio} \quad n\tau \geq 5 \cdot 10^{15} \frac{\text{s}}{\text{cm}^3}$$

Para lograr el confinamiento del plasma de manera que se satisfaga el criterio de Lawson existen principalmente tres posibilidades:

- **Confinamiento gravitatorio:** donde se emplea la fuerza de la gravedad para contener el plasma. Es el que se da como proceso natural en las estrellas pero no es reproducible a escala terrestre.
- **Confinamiento magnético:** donde el plasma de baja densidad a elevadas temperaturas se mantiene confinado mediante campos magnéticos, lo cual es posible gracias a que el plasma está formado por partículas cargadas.
- **Confinamiento inercial:** donde una diminuta cápsula de combustible se comprime inercialmente, generalmente mediante láseres de gran potencia. Con este método se contiene el plasma durante muy poco tiempo pero a densidades extremadamente altas, lo que permite que se produzcan muchas reacciones.

Por tanto, a escala terrestre, existen en la actualidad dos modos de confinamiento viables para la generación de energía mediante fusión nuclear: la Fusión por Confinamiento Magnético (FCM) y la Fusión por Confinamiento Inercial (FCI). Las principales características de estos modos de confinamiento se explican en los capítulos 3 y 4.

La estrategia de la fusión por confinamiento magnético es confinar el plasma caliente por medio de campos magnéticos helicoidales (resultado de combinar campos magnéticos toroidales y poloidales), que lo mantengan



permanentemente en trayectorias cerradas para que no toque la pared de la cámara. Para conseguir un funcionamiento óptimo es esencial contener el plasma para que circule únicamente por senderos previamente delimitados, a fin de mantener una temperatura y una densidad óptimas para la fusión. Actualmente existen dos formas de crear los campos helicoidales: tokamaks y stellarators. En el caso de los tokamaks (del acrónimo ruso para cámara toroidal con bobinas magnéticas) una parte del campo magnético es generado por una corriente eléctrica que circula por el propio plasma. En los stellarators todo el campo magnético es producido mediante corrientes en solenoides helicoidales en el exterior cuya disposición puede ser muy compleja. A día de hoy los tokamaks son los aparatos que permiten alcanzar más fácilmente el confinamiento necesario para producir reacciones de fusión. Esto se refleja en el diseño tokamak del proyecto de Reactor Termonuclear Experimental Internacional, conocido como ITER.

Aunque existen otras modalidades (ver Z-pinch en el capítulo 4, apartado 3.5), la estrategia principal de la fusión por confinamiento inercial es depositar una alta densidad de energía en una pequeña capsula de deuterio-tritio, que logre una rápida implosión, y subsiguiente fusión, en un tiempo tan corto que los núcleos no tengan tiempo para alejarse unos de otros.

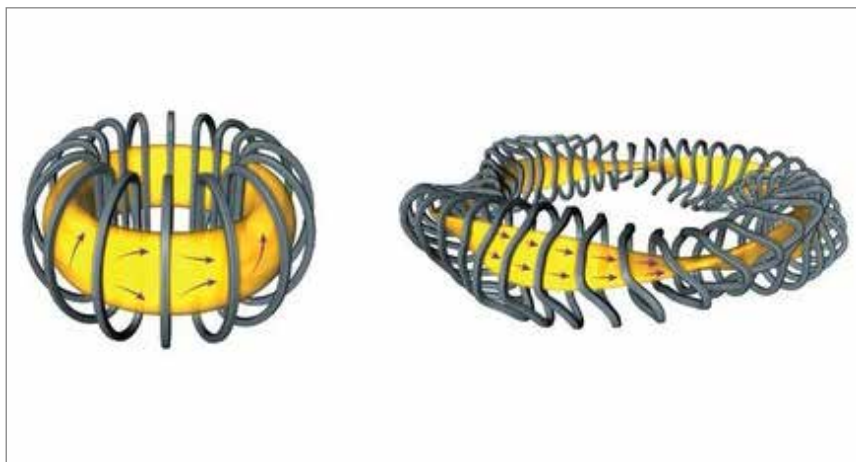


Figura 2.9 Configuraciones de confinamiento magnético: tokamak (izda.) y stellarator (dcha.)



Esto se consigue dirigiendo sobre la cápsula una enorme cantidad de energía (generalmente mediante un haz láser) que evapora su capa exterior, haciendo que se expanda y produciendo un frente de compresión hacia el interior, que provoca la implosión inercial de la cápsula. Esto causa que el núcleo interno incremente su densidad por mil y su temperatura ascienda hasta el punto de ignición muy rápidamente. Los reactores de prueba más avanzados usan láseres, particularmente en el LLNL (*Lawrence Livermore National Laboratory*) de EE. UU. A nivel europeo cabe destacar la instalación LMJ (*Laser Mégajoule*) actualmente en construcción en Burdeos, Francia.

En el confinamiento inercial las densidades del plasma son muy elevadas, en torno a $10^{31} m^{-3}$, por lo que, según con el criterio de Lawson, se necesitan tiempos de confinamiento muy reducidos, del orden de $10^{-11} s$. Por el contrario, en el confinamiento magnético, las densidades del plasma son más reducidas, del orden de $10^{20} m^{-3}$, por lo que el tiempo de confinamiento para cumplir con el criterio de Lawson debe ser superior a 1 s. De esta manera, mientras que el confinamiento magnético busca extender el tiempo que los iones pasan cerca unos de otros con el fin de facilitar la fusión, la estrategia del confinamiento inercial se basa en fusionar núcleos tan rápidamente que no tengan tiempo de expandirse.

Como se ha mencionado, en la actualidad existen instalaciones experimentales destinadas a demostrar la viabilidad científica de ambas propuestas: ITER en el caso de confinamiento magnético y NIF y LMJ en el caso de confinamiento inercial. Una vez superada la etapa experimental se pondrán en marcha los proyectos de prototipos de plantas de potencia.

La descripción de estos conceptos y de su estado actual de desarrollo constituye el contenido de la mayor parte de los capítulos del presente libro.

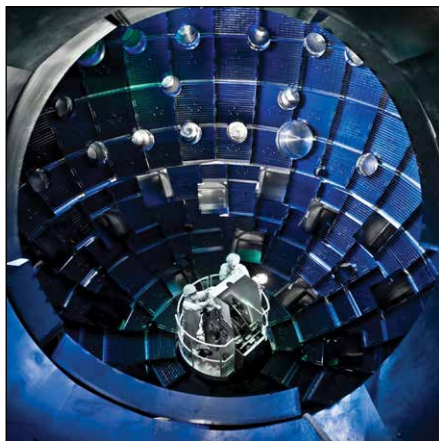


Figura 2.10 Cámara donde se sitúan los blancos en el Lawrence Livermore National Laboratory



7. CONCLUSIONES

Tras las fases iniciales del universo, hace aproximadamente 13 700 millones de años, su materia estaba constituida fundamentalmente por hidrógeno y helio puros y sin ningún otro elemento. Regiones más densas de aquel gas eventualmente colapsaron bajo su propia gravedad produciendo estrellas. Las estrellas produjeron elementos más pesados de los siguientes millones a miles de millones de años. Al final de sus vidas, las estrellas diseminaron los elementos formados en su interior por el espacio mediante las nebulosas planetarias y las supernovas, siendo estas últimas las responsables de la generación de los elementos más pesados que el hierro. Los elementos liberados formaron nuevas estrellas y el proceso continúa hoy.

El efecto túnel, consecuencia del comportamiento mecano-cuántico de las partículas, juega un papel esencial en la fusión nuclear ya que, en su ausencia, las temperaturas de fusión que serían necesarias para igualar la barrera de repulsión coulombiana serían extremadamente altas. De esta manera, el efecto túnel es el que permite que las estrellas fusionen elementos, produciendo energía y núcleos más pesados. En el Sol, donde la energía que poseen los núcleos de hidrógeno no es suficiente para superar la barrera coulombiana existe, gracias al efecto túnel, una probabilidad de que algunos protones la sobrepasen, produciendo la fusión de los mismos y liberando energía. Aunque la probabilidad de que se produzca el efecto túnel es muy pequeña, la enorme cantidad de partículas que componen el Sol hace que este efecto se produzca constantemente. En el Sol se fusionan cada segundo 657 millones de toneladas de hidrógeno en 653 millones de toneladas de helio. Los 4 millones de toneladas de diferencia de masa se convierten en energía. A las elevadas temperaturas necesarias para alcanzar las condiciones de fusión, la materia se encuentra en estado de plasma (denominado el cuarto estado de la materia) que implica la ionización parcial o completa del material, de tal manera que está formado por iones y electrones y presenta propiedades específicas tales como una alta conductividad eléctrica y la aparición de efectos colectivos. El requisito básico de cualquier reactor de fusión nuclear es el de confinar dicho plasma con la temperatura y densidad lo bastante elevadas y durante el tiempo justo, a fin de permitir que ocurran suficientes reacciones de fusión nuclear para obtener una ganancia neta de energía. La condición necesaria para la liberación de energía a partir de un reactor termonuclear viene dada por el llamado criterio



de Lawson, que establece que el producto de la densidad de los núcleos en el plasma y el tiempo del confinamiento de éste, a la temperatura de ignición apropiada, debe exceder un cierto valor umbral.

A presiones mucho más bajas de las conseguidas en el Sol, como son las que podemos conseguir en la Tierra, se requieren temperaturas por encima de 100 millones de grados Celsius para obtener ritmos adecuados de producción de energía de fusión, lo cual exige que el plasma no esté en contacto con el material de las paredes mediante un adecuado confinamiento.

Hay dos métodos viables de confinamiento del plasma a escala terrestre: magnético e inercial. En el confinamiento magnético, un plasma de baja densidad se confina mediante campos magnéticos que lo mantienen permanentemente en trayectorias cerradas, existiendo dos diseños posibles en la actualidad: los tokamaks, con forma toroidal, y los stellarators, con forma helicoidal más compleja. En el confinamiento inercial, una diminuta cápsula de combustible se comprime inercialmente, generalmente mediante láseres de gran potencia, de manera que el plasma se confina durante muy poco tiempo pero a densidades extremadamente altas.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Fusión Nuclear, J. M. Perlado, O. Cabellos, A. Rivera
- [2] Plasma Physics and Fusion energy, Jeffrey Freidberg.
- [3] Plasma Physics, Justin Wark
- [4] ITER Physics basis. Nuclear Fusion Vol. 39, 1999
- [5] <http://phdcomics.com/comics.php?f=1716> What is Fusion? Simuladores de fusión (en inglés)
- [6] http://fusionsites.ciemat.es/?attachment_id=1992 Póster “Fusión, la energía de las estrellas en la Tierra”

BIBLIOGRAFÍA DE FIGURAS

- [2.1] Elaboración propia
- [2.2] Elaboración propia
- [2.3] Elaboración propia
- [2.4] Elaboración propia en base a: Dominio público, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fusion_rxnrate.svg



[2.5] Elaboración propia en base a: www.tetronics.com

[2.6] Elaboración propia

[2.7] Elaboración propia

[2.8] Elaboración propia

[2.9] Elaboración propia en base a : Max-Planck Institut für Plasmaphysik

Dominio público, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:W7X-Spulen_Plasma_blaugelb.jpg

[2.10] Tomada de: *Lawrence Livermore National Laboratory*



3 - FUSIÓN POR CONFINAMIENTO MAGNÉTICO

Nuria Moral Fernández
Autora

Nuria Gordillo García
Revisora

1. INTRODUCCIÓN

Como se ha visto en el capítulo anterior (capítulo 2, apartado 6), para alcanzar la ignición se requiere producir y mantener un plasma confinado durante el tiempo suficiente y bajo las condiciones necesarias como para que se produzca un número suficiente de reacciones de fusión en el seno del combustible. Una de las opciones para conseguirlo es el denominado confinamiento magnético, la solución adoptada por ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*).

En este capítulo se pretende aportar al lector una visión general del proceso de FCM (Fusión por Confinamiento Magnético). En este mismo apartado de introducción se presentan algunos conceptos generales sobre la fusión nuclear, como lo son el esquema de la planta o el concepto de ignición. A lo largo del siguiente apartado se tratan los fundamentos físicos y tecnológicos básicos de la FCM, como lo son el movimiento de partículas cargadas en el seno de un campo magnético, los métodos de calentamiento del plasma, las inestabilidades del plasma en una cámara de fusión o la superconductividad. Asentadas las bases, se procederá a describir los detalles de las dos modalidades que en la actualidad se contemplan para la FCM: el tokamak y el stellarator. Se aprovecha luego para describir, en el marco del ciclo de combustible, una parte de la instalación común a todas las metodologías de confinamiento: la planta reproductora de tritio.

1.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES DE UNA PLANTA DE FUSIÓN

Nos encontramos frente a dos opciones para el desarrollo comercial de la fusión nuclear: magnética o inercial. Cada una de ellas tiene su propia tecnología, pero también comparten muchos componentes.

La figura 3.1 presenta el esquema de un reactor de fusión nuclear. Se parte de un plasma de deuterio y tritio, que son los reactivos de la fusión nuclear, en el interior del reactor. Existe una gran abundancia de deuterio en el agua de la Tierra que se puede obtener mediante un proceso de enriquecimiento. No obstante, no sucede lo mismo con el tritio, que no se encuentra en la naturaleza y que se debe obtener a través de medios artificiales como la irradiación de litio con neutrones.

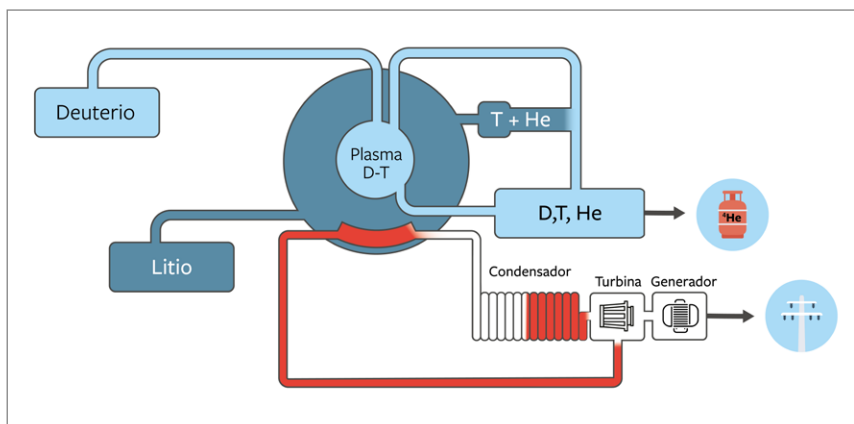


Figura 3.1 Esquema de una planta de fusión nuclear

Cabe destacar que el concepto termodinámico no difiere del de otras centrales termoeléctricas actuales basadas en el ciclo Rankine: centrales térmicas convencionales (petróleo, gas o carbón), ciclos combinados, centrales solares de concentración o centrales nucleares de fisión. En todas se aprovecha el calor generado para calentar agua y convertirla en vapor. Este vapor se dirige a una turbina que hace girar un alternador o generador eléctrico. Por último, el vapor es condensado en un ciclo de refrigeración que evacúa el calor al foco frío exterior.



1.2 CONCEPTO DE IGNICIÓN

Un concepto de particular relevancia es el criterio de ignición (ver capítulo 2, apartado 6), que establece el valor mínimo de la temperatura para la que el sistema se encuentre en funcionamiento autosostenido. El criterio de Lawson debe su nombre a John Lawson, quien fue el primero en poner sobre la mesa qué condiciones son necesarias para generar más energía que la que se inserta en una reacción de fusión. Este criterio establece que, para la temperatura de ignición mínima, se requieren una densidad (n) y un tiempo de confinamiento mínimos (τ). Para el deuterio-tritio tenemos que, para $T = 4,8 \text{ keV}$:

$$n\tau \geq 2 \cdot 10^{14} \frac{\text{s}}{\text{cm}^3}$$

Si además de la densidad y el tiempo de confinamiento incluimos la temperatura en la inecuación tendremos la figura de mérito más utilizada para determinar la ganancia energética: el producto triple. Esto es, con el criterio del punto triple se pueden comparar las condiciones mínimas de distintas reacciones o sistemas para que el sistema de fusión funcione de forma rentable como se observa en la figura 3.2.

Atendiendo a este criterio y centrándonos en la FCM, se muestra en la figura 3.3

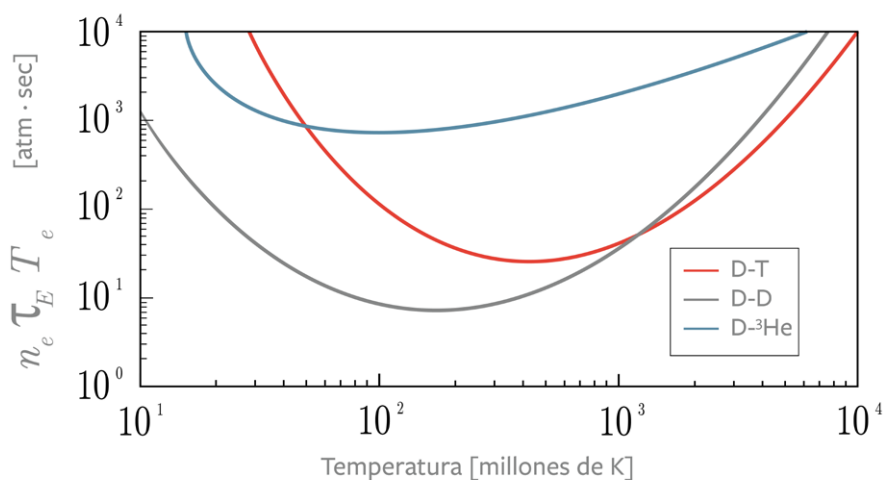


Figura 3.2 Producto triple para las reacciones D-T, D-D y D- ^3He



la evolución en el tiempo del criterio de Lawson en diferentes tokamak, y cómo cada vez estamos más cerca de alcanzar la ignición.

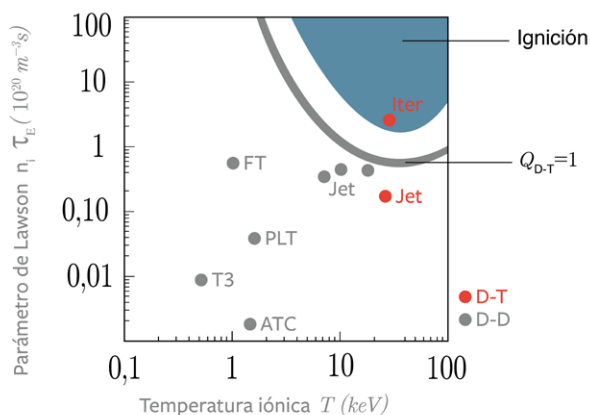


Figura 3.3 Evolución del parámetro de Lawson en diferentes tokamak

2. FÍSICA DE LA FCM

Antes de poder continuar con la explicación de las tecnologías involucradas en la FCM, se hace necesario repasar ciertos conceptos relacionados con el electromagnetismo y que son de especial relevancia en este campo.

2.1 FUERZAS ELECTROMAGNÉTICAS

Para comprender el funcionamiento de la FCM es necesario saber cómo interactúan las partículas cargadas con los campos electromagnéticos. Esta interacción es la conocida como fuerza de Lorentz, que actúa sobre cualquier partícula cargada que atraviese un campo electromagnético respondiendo a la siguiente fórmula:

$$\mathbf{F} = q \cdot (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$



Donde $\mathbf{F}$ es la fuerza que actúa sobre la partícula, q es la carga de la misma y $\mathbf{v}$ es su velocidad. El campo electromagnético estará definido por sus valores vectoriales eléctrico, $\mathbf{E}$ y magnético $\mathbf{B}$. Esto significa, que siempre que tengamos un campo electromagnético y existan partículas cargadas podremos influir sobre sus trayectorias variando las componentes $\mathbf{E}$ y $\mathbf{B}$. Es gracias a esta propiedad de nuestro universo, reflejada en esta ley, que son posibles los confinamientos magnéticos de plasmas.

En ausencia de una velocidad paralela al campo magnético, las trayectorias de las partículas cargadas moviéndose en el seno de un campo $\mathbf{B}$ uniforme tendrán una forma circular (ver figura 3.4 izda.). Si existe una componente de la velocidad que sea paralela al campo magnético entonces las trayectorias tendrán una forma helicoidal, como se puede ver en la figura 3.4, dcha.

Este movimiento circular crea pequeñas corrientes circulares que originan campos magnéticos que se oponen a la dirección del campo magnético aplicado. El radio de esta hélice dependerá de características de las partículas (como la relación carga-masa o su velocidad), así como del propio campo magnético.

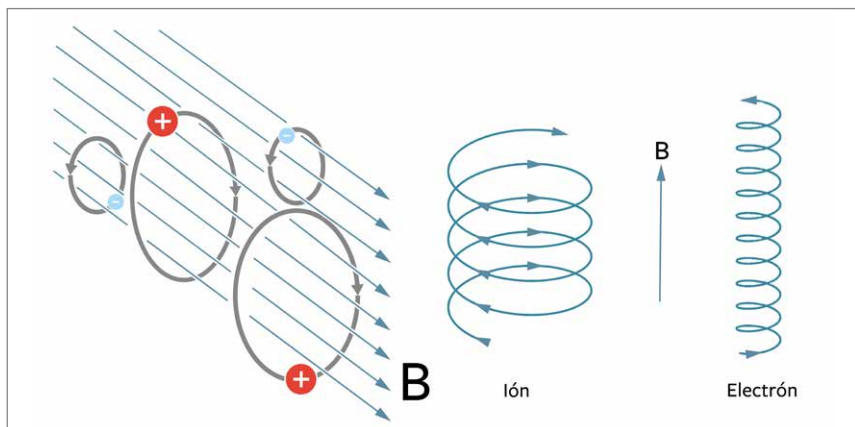


Figura 3.4 Movimiento de rotación de iones y electrones en un campo magnético uniforme

Con estos campos electromagnéticos, se podría tener confinadas las partículas cargadas (plasma) siempre y cuando se tuviese un tubo infinitamente largo. Como en la práctica esto no es factible, lo que se hace es utilizar la forma



toroidal obtenida al unir los dos extremos de este tubo. Sin embargo, a pesar de usar trayectorias circulares el problema no está resuelto ya que aparece un curioso efecto. Si además de una componente de la velocidad paralela al campo magnético tenemos una fuerza externa (la centrípeta, la gravedad o cualquier otra) que actúa sobre la partícula, aparecerá la denominada velocidad de deriva, que se puede apreciar en la siguiente fórmula:

$$\mathbf{v}_d = \frac{\mathbf{F} \times \mathbf{B}}{q \cdot B^2}$$

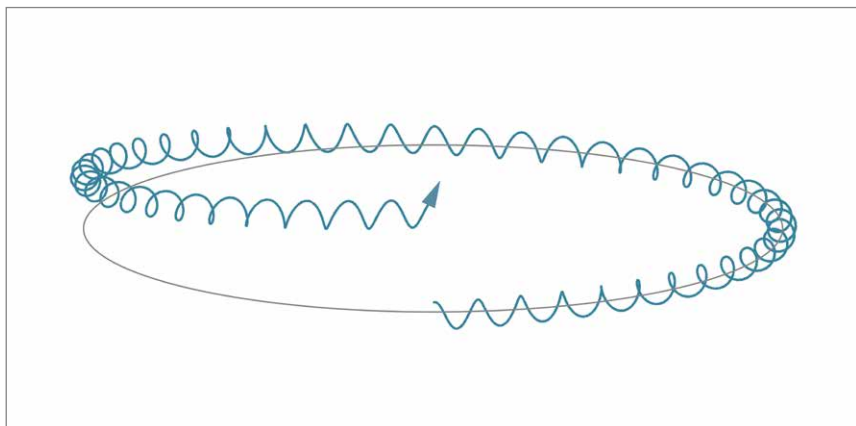


Figura 3.5 Movimiento de una partícula cargada a consecuencia de la velocidad de deriva

A consecuencia de esta velocidad de deriva, las partículas tienden a desviar su trayectoria en la dirección perpendicular, tal como se muestra en la figura 3.5. Es decir, acabarán escapando del toro si no se aplica otra fuerza adicional que las confine.

Para contrarrestar esta velocidad de deriva se emplea otro campo magnético en la dirección poloidal, transformando así las líneas de campo en helicoides, como se muestra en la figura 3.6. Aquí es, como veremos más adelante, donde radica la diferencia física fundamental entre un tokamak y un stellarator.



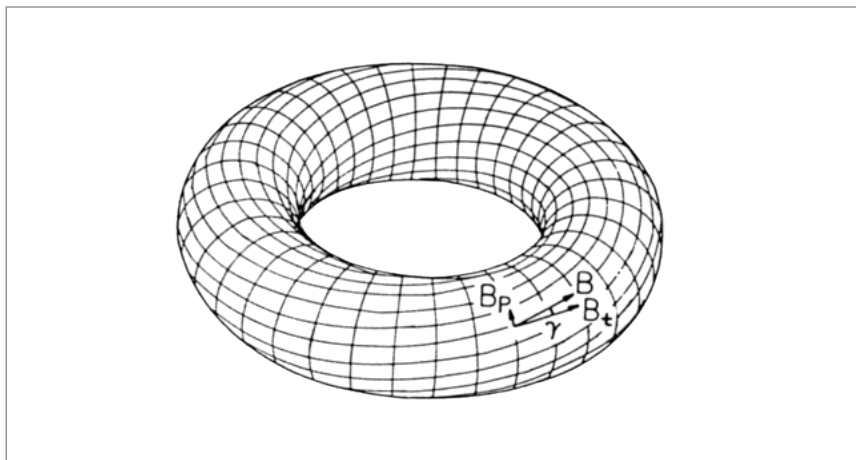


Figura 3.6 Líneas de campo helicoidales que permiten el confinamiento del plasma

2.2 CALENTAMIENTO DEL PLASMA

Las astronómicas temperaturas a las que debe ser calentado el plasma para obtener reacciones de fusión hacen que este proceso sea, en sí mismo, un reto tecnológico nada desdeñable. Una vez se inicia la reacción de fusión, una parte de la energía generada en ésta es depositada en el propio plasma por medio de las partículas alfa (que son de corto alcance debido a su doble carga positiva), pero otra parte importante de la energía es extraída por los neutrones o las radiaciones térmicas del plasma. Por ello, es preciso disponer de distintos métodos complementarios para alcanzar y mantener la temperatura del plasma (ver figura 3.7).

Calentamiento Óhmico

Al existir una corriente en el seno del plasma (ver apartado 3), se producirá una liberación de calor por efecto Joule como ocurre en cualquier cable de corriente. Este calor será absorbido en su mayoría por el propio plasma haciendo que aumente así su temperatura. Sin embargo, a mayor temperatura del plasma, mejor será su conductividad y por lo tanto menos efectivo será el efecto Joule. Es por esto que se necesitan otros métodos de calentamiento.



Calentamiento por ondas electromagnéticas

Se dispone de emisores de ondas electromagnéticas que apuntan hacia el interior del plasma. Gracias a que estas ondas se emiten en frecuencias resonantes con la frecuencia típica del plasma, la absorción de energía en el mismo se produce con la eficacia máxima.

Calentamiento por inyección de haces de partículas neutras

Este método consiste en acelerar partículas hasta temperaturas mucho más elevadas que la del plasma e inyectar estas partículas directamente en el mismo. Al tratarse de partículas neutras no son desviadas por el campo magnético al inyectarlas, así viajan en trayectorias rectilíneas hasta que son ionizadas por colisiones con el plasma. Una vez ionizadas, se convierten en parte del plasma contribuyendo a la cola de alta energía en la función de distribución. Esta cola de alta energía se termaliza por medio de colisiones, transfiriendo su energía al plasma en forma de calor.

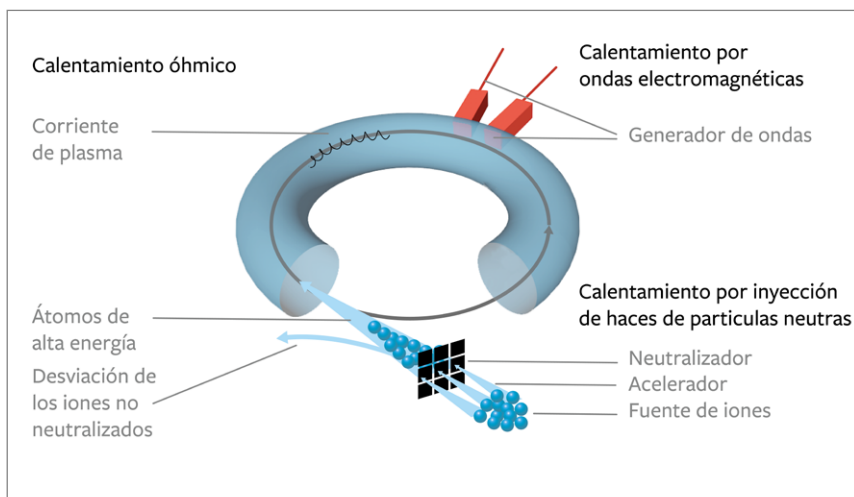


Figura 3.7 Sistemas de calentamiento del plasma



2.3 INESTABILIDADES DEL PLASMA

El confinamiento magnético del plasma no es un problema resuelto a día de hoy. Los plasmas y su comportamiento todavía guardan incógnitas, de las cuales muchas siguen sin estar totalmente resueltas. El primer problema que se encuentra para el confinamiento es el provocado por las inestabilidades “magneto-hidrodinámicas”, turbulencias propias de un fluido. Una pequeña perturbación en el plasma puede provocar inestabilidades que conduzcan al fenómeno conocido como disrupción del plasma.

Una disrupción del plasma consiste en la pérdida del confinamiento del mismo con las consecuencias que esto supone: cuando el plasma pierde su confinamiento, entra en contacto con las paredes de la cámara infligiendo daño en los materiales. Además, este contacto vaporiza parte de la superficie interna de la cámara, que se introduce en el plasma y provocará inestabilidades aún mayores, este fenómeno puede verse realimentado positivamente: las disrupciones del plasma pueden comenzar con una pequeña inestabilidad que, mediante una reacción en cadena, acaba con el desconfinamiento total del plasma y el daño a la cámara de reacción.

Las disrupciones del plasma han de ser totalmente evitadas en un reactor comercial. Para ello, se espera que los estudios que se realicen en ITER logren este objetivo. Hay, sin embargo, otro fenómeno dañino inherente a la física del plasma, ante el cual la única posibilidad es la de paliar sus consecuencias: los modos localizados en el borde (también conocidos como ELMs por su acrónimo en inglés).

Los ELMs, se supone, son provocados por la propia presión que tiene cualquier gas. Al existir un confinamiento, la presión subirá en las paredes próximas a la última línea de campo que provoca el confinamiento. Cuando la presión es demasiado elevada, se produce una descarga repentina hacia el divertor (ver apartado 3.1.2) aliviando así la presión en el borde. Se puede ver el mecanismo de los ELMs en la figura 3.8. Si mediante la configuración de los campos electromagnéticos se consiguiese evitar las disrupciones y reducir los efectos de los ELMs, se obtendría un plasma estable.



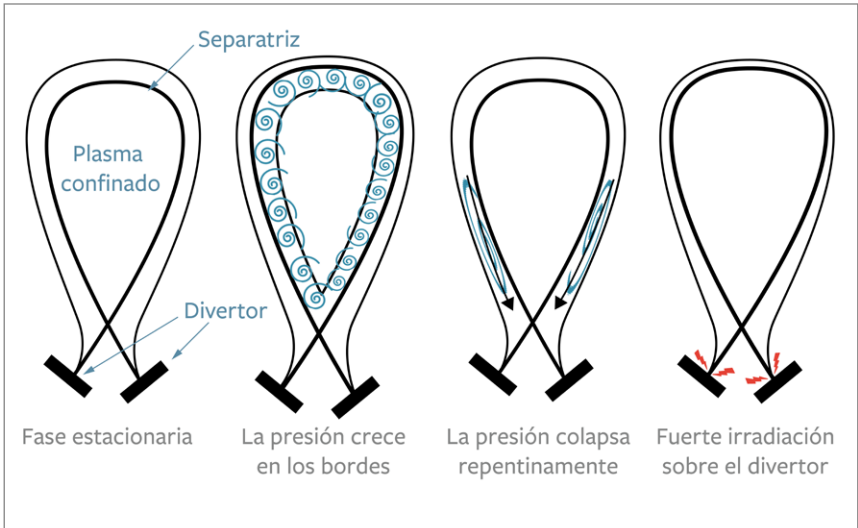


Figura 3.8 Creación y destrucción de los modos localizados en el borde (ELMs)

2.4 LA CONSTANTE BETA DEL PLASMA

Para caracterizar un plasma existe un parámetro muy utilizado llamado constante beta, o beta del plasma. Simbolizado como β , es el cociente entre la presión interna del plasma producida por el hecho mismo de ser un gas, y la presión magnética a la que está sometido. La formulación de este parámetro es la siguiente:

$$\beta = \frac{p}{p_{mag}} = \frac{n \cdot k_b \cdot T}{\left(\frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} \right)}$$

Si β es superior a la unidad, los efectos cinéticos predominan en su comportamiento, y si es inferior, los efectos magnéticos son los predominantes. El uso de este parámetro es extremadamente útil ya que los imanes generadores del campo magnético necesario para confinar el plasma tienen un coste que escala con la raíz cuadrada de β , con lo cual este factor puede ser usado como



figura de mérito, siendo un indicador económico de la eficiencia del reactor. Para construir un reactor económicamente útil, se necesitarían betas mayores a un 5%. Las inestabilidades del plasma suponen un freno al crecimiento de este factor.

En un tokamak, beta es normalmente mucho menor que la unidad, rondando valores del 1%, como puede encontrarse también en la corona solar. El record de este factor lo tiene el tokamak START, que usando una geometría de cámara esférica consiguió llegar al 40%.

2.5 SUPERCONDUCTIVIDAD

Un fenómeno que tiene un lugar propio dentro de la tecnología de la FCM es el de la superconductividad. Los intensos campos magnéticos que se deben generar en las instalaciones de FCM se inducen a través de enormes corrientes eléctricas. De no ser por la superconductividad, el efecto Joule antes citado haría que, debido a las pérdidas y el calentamiento, esta tecnología no fuese viable. Éste es un fenómeno que puede aparecer en ciertos materiales y que produce que la resistividad del material al paso de la corriente eléctrica sea nula, eliminando así el efecto Joule¹.

A pesar de que la superconductividad fue descubierta a principios del siglo XX, a día de hoy no se cuenta con una teoría satisfactoria completa sobre la misma que consiga explicar todos los fenómenos observados. Sin embargo, sí existen varias aproximaciones que parecen explicar muchos de ellos, entre las que se encuentran:

Teoría BCS

Esta teoría de 1957 (por la que sus autores recibieron el premio Nobel), apunta a que los electrones dentro de un superconductor se aparejan formando los llamados “pares de Cooper”. El movimiento de los pares de Cooper a través de un sólido cristalino adecuado no tiene, debido a efectos cuánticos, resistencia alguna.

Teoría Ginzburg-Landau

Esta teoría enfoca el problema desde un punto de vista macroscópico.

¹ La resistividad es, efectivamente, “nula”; no es que lo sea a efectos prácticos, sino que la resistividad de un material superconductor es exactamente cero. Por ejemplo, una corriente eléctrica que fluye en una espira hecha de un material superconductor puede persistir indefinidamente sin fuente de alimentación



Se fundamenta en la variable termodinámica “función de Helmholtz” y su minimización gracias a la movilidad de los electrones en el superconductor. Esta teoría, de 1950, es capaz de predecir mejor la superconductividad en materiales heterogéneos.

3. ESQUEMAS DE CONFINAMIENTO MAGNÉTICO

Como se ha venido comentando, en la FCM se intenta mantener el plasma confinado mediante campos magnéticos durante el tiempo suficiente para conseguir una ganancia energética aceptable. La base teórica para lograr este efecto consiste en utilizar la fuerza de Lorentz descrita en el apartado anterior para, mediante el campo magnético pertinente, modificar la trayectoria de las partículas cargadas y así mantenerlas en el interior del sistema. Los primeros sistemas en este sentido se diseñaron como cilindros que contenían el plasma, moviéndose las partículas con su componente principal del movimiento en la dirección de su generatriz. El problema inmediato de este diseño radica en la pérdida de masa en los extremos del sistema, por lo que surge de manera natural el siguiente paso, consistente en curvar el cilindro hasta cerrarlo por sus extremos, tornando así el concepto hacia el toro geométrico. En el presente apartado se hará un repaso de las dos principales estrategias que se emplean para lograr el confinamiento durante el tiempo necesario.

3.1 TOKAMAKS

El ingenio que Igor Yevgenyevich Tamm y Andréi Dmítrievich Sájarov (para la parte histórica ver capítulo 6) diseñaron para contener el plasma se denominó tokamak (*TOroidal'naya KAmera s MAgnitnymi Katushkami*, es decir, cámara toroidal con bobinas magnéticas).

3.1.1 SISTEMA MAGNÉTICO

En su configuración básica, el tokamak consiste en un receptáculo toroidal. Alrededor de la cavidad se disponen las bobinas de campo toroidal, que inducen



el campo magnético de mismo nombre, cuya forma es semejante a la directriz del toro (ver la parte superior de la figura 3.9). Debido a la deriva magnética, este campo no se basta para mantener el plasma en el interior y es preciso añadir un nuevo campo en la dirección poloidal. La forma de generar este campo es inducir una corriente en el propio plasma (que es un medio conductor por estar formado de partículas cargadas). Esta corriente se logra convirtiendo el tokamak en un transformador, situando en su centro el primario de un transformador eléctrico que, a través de una corriente eléctrica monótonamente creciente, provoca a su vez una corriente en la dirección toroidal en el propio plasma (que a su vez se convierte en el secundario del transformador). Esto genera el campo toroidal tal como se muestra en la segunda parte de la figura 3.9 El campo final resultante es un helicoide que recorre el interior del toro (representado en la última parte de la figura 3.9). El principal inconveniente de esta forma de generar el campo poloidal es que la magnitud de la corriente del primario debe hacerse crecer de forma continuada para mantener la inducción, y la imposibilidad de aumentar esta corriente sin límite lleva a funcionar de forma pulsada. Además se utilizan otras bobinas extra para matizar la forma del campo.

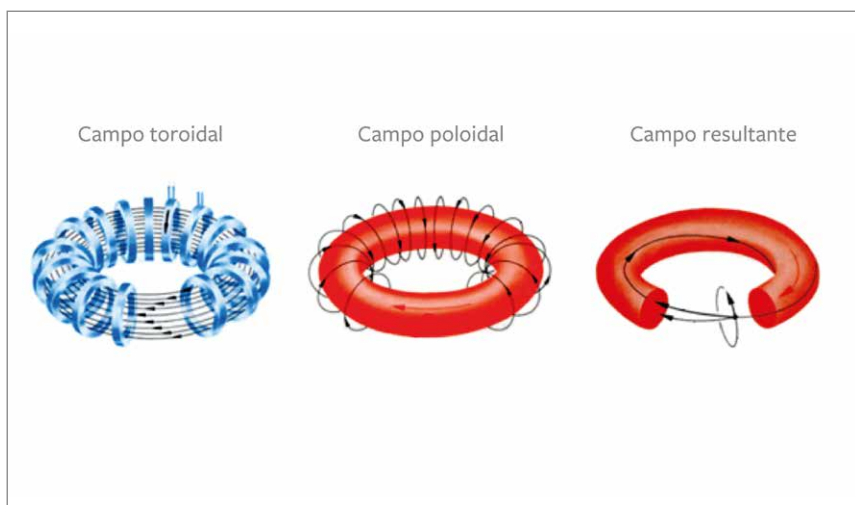


Figura 3.9 Campos magnéticos en el tokamak



La intensidad de estas bobinas o la magnitud de la corriente inducida en el secundario conforman la llamada configuración magnética del reactor, que tiene por fin minimizar las inestabilidades producidas en el plasma. A fin de evitar las excesivas pérdidas, las bobinas funcionan como superconductores, por lo que deben estar intensamente refrigeradas.

3.1.2 PRINCIPALES SISTEMAS DEL TOKAMAK

Vasija de vacío

La vasija del reactor está herméticamente cerrada y en condiciones de vacío, de manera que actúa también como la primera barrera de seguridad y blindaje, evitando fugas de partículas radiactivas y protegiendo a los elementos tecnológicos del intenso campo neutrónico. Su condición de primera pared le concede determinadas responsabilidades, como la de recoger la energía térmica portada por los neutrones o la radiación saliente del plasma. Se encuentra también surcada de diversas penetraciones que dan acceso al interior a través de telemanipuladores y a los distintos métodos de calentamiento del plasma. También se encuentran los *blankets* de doble propósito (extraer el calor y reproducir el litio).

Divertor

El divertor es el elemento tecnológico que, situado en la cota inferior de la cámara del reactor, tiene por misión recoger las diversas partículas que resultan de la reacción de fusión o el calentamiento del plasma (ya sea el helio o los átomos insertados como neutros). Estas partículas son dirigidas hacia el divertor valiéndose de los campos magnéticos y de su superior masa con respecto al deuterio y al tritio. Las altísimas temperaturas alcanzables en el interior de la cámara durante el funcionamiento, así como la tasa de daño atómico, convierten el diseño de esta pieza en uno de los mayores retos del desarrollo tecnológico de la fusión industrial por confinamiento magnético. Encontrar los materiales capaces de soportar las intensas tasas de abrasión y daño a las que se encontrará sometido el divertor es clave, y tanto el wolframio (resistencia al daño atómico) como los compuestos derivados de la fibra de carbono (carbono reforzado con fibra de carbono CFC, resistente a la abrasión) son los mejores candidatos actualmente.



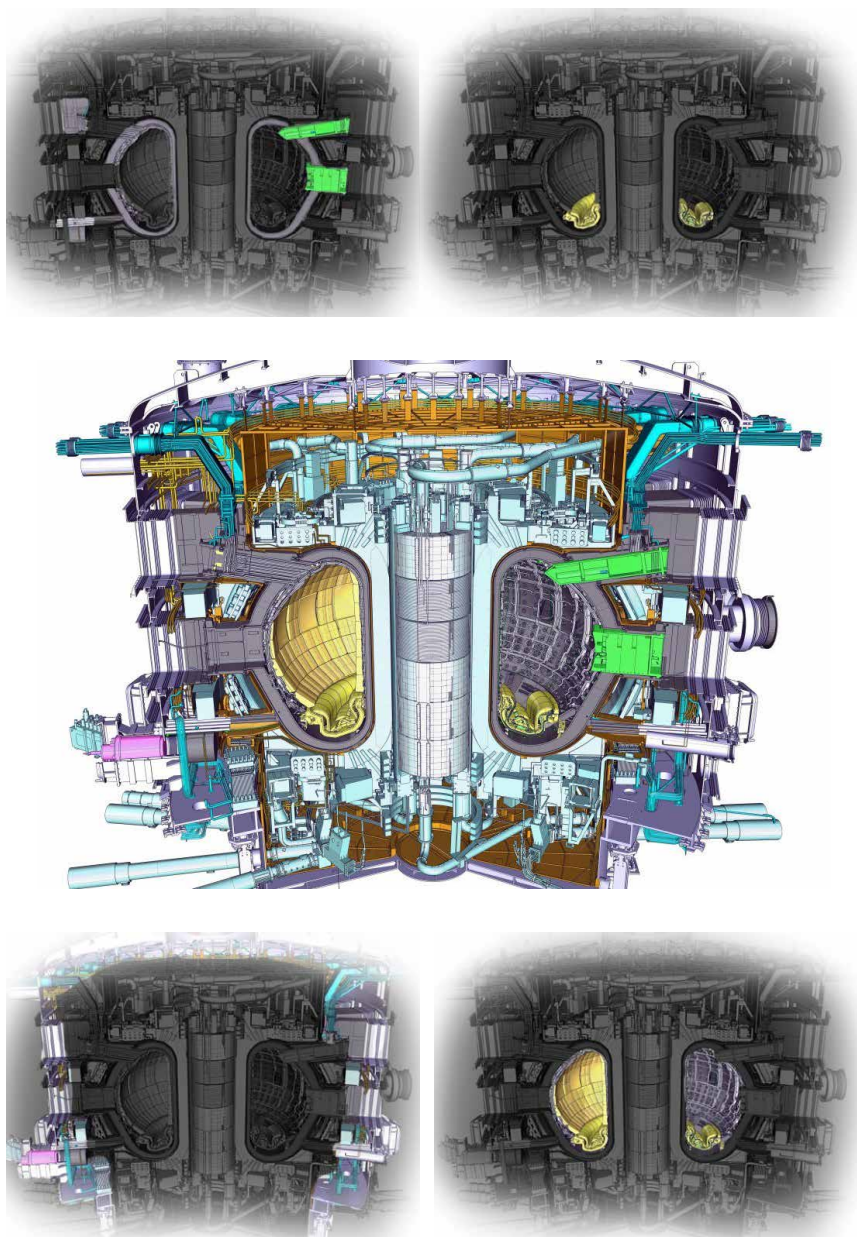


Figura 3.10 Principales componentes de ITER: Manto reproductor (arriba izda.). Divertor (arriba dcha.). Criostato (abajo izda.). Vasija de vacío (abajo dcha.)



Sistemas remotos

Una vez se inicien las operaciones con tritio será imposible acceder al tokamak debido a la alta radiación que habrá en el interior de la cámara de vacío, por lo que los sistemas de control remoto tendrán un papel fundamental. El mantenimiento de los diferentes componentes que se encuentren en el interior de la vasija, tales como el manto reproductor, el divertor o los sistemas de diagnóstico, sólo se podrá realizar de forma remota. La fiabilidad, precisión y rapidez con que funcionen los sistemas de control remoto influirán en la duración de las paradas del tokamak. Además de los estrictos márgenes de tolerancia con los que tendrán que trabajar, también tendrán que contar con que los equipos y herramientas tendrán que trabajar bajo condiciones de alta irradiación. La frecuencia con la que se cambien los componentes dependerá del uso de los mismos y de la velocidad a la que se vayan deteriorando.

Criostato

El tokamak está envuelto en un criostato, con aislantes térmicos entre los componentes calientes y las bobinas magnéticas, para mantener sus condiciones de superconductividad. El criostato contiene helio líquido en su interior a una temperatura de 4 K.

3.2 STELLARATOR

Del latín *stella* y *generator*, literalmente “el generador de estrellas” en alusión a la generación de energía por el mismo proceso que se da en las estrellas, el stellarator es el diseño que Lyman Spitzer propuso en 1951, reaccionando al anuncio del general Perón de que Argentina había logrado controlar la producción de energía por fusión nuclear (ver capítulo 6 para más detalles). La diferencia principal entre el diseño del tokamak y del stellarator radica en la diferente forma de generar la componente poloidal del campo magnético para evitar la deriva del plasma y confinarlo. En el caso del stellarator, esta componente se logra con la forma de las bobinas y su disposición. En los stellarator se tienen bobinas externas helicoidales que confieren un movimiento ondulado al plasma a lo largo del toro. La superficie del flujo no es axisimétrica, sino que varía cíclicamente a lo largo de la dirección toroidal. En la figura 3.11 se muestra el esquema de un stellarator, donde se ve que la configuración de



los solenoides helicoidales es muy compleja.

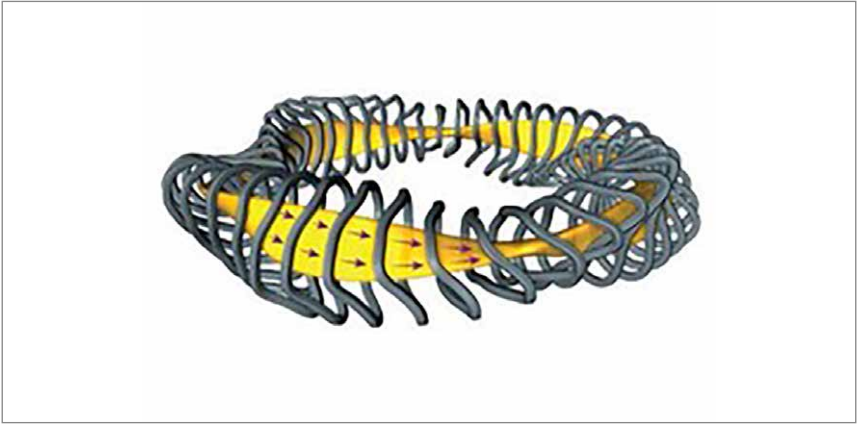


Figura 3.11 Esquema de un Stellarator

Además del esquema mostrado en la figura 3.11, se enumeran a continuación los modelos de stellarator más importantes:

Stellarator clásico

Se trata del diseño con forma de toro con bobinas helicoidales separadas en cada extremo para producir la rotación del campo (ver figura 3.11).

Stellarator espacial

El diseño original ideado por Lyman Spitzer. Su geometría tiene forma de 8 (en planta), lo que permite producir los campos magnéticos helicoidales.

Torsatrón / Heliotrón

La forma de las líneas de campo magnético se consigue mediante una bobina helicoidal que rodea al plasma.

Helíacos

Se trata de un stellarator con eje helicoidal. Se dispone un conjunto de bobinas planas circulares distribuidas a lo largo de una hélice enrollada alrededor de la bobina central. El plasma torcido induce torsión en las líneas de campo magnético para efectuar la cancelación de deriva, y típicamente puede



proporcionar más torsión que el torsiótrón o heliotrón, especialmente cerca del centro del plasma (eje magnético).

Helias

Stellarator avanzado con bobinas modulares. Se trata de un stellarator helicoidal avanzado, usando un sistema optimizado de la bobina modular diseñado para alcanzar simultáneamente alto plasma, y buen confinamiento. El helias se ha propuesto para ser el concepto más prometedor del stellarator para una central eléctrica, con un diseño de ingeniería modular y plasma optimizado, MHD (Magnetohidrodinámico) y propiedades del campo magnético.

3.3 DIFERENCIAS ENTRE TOKAMAK Y STELLARATOR

La diferente forma de disponer y generar los campos magnéticos en los diseños del tokamak y del stellarator hace que presenten ventajas e inconvenientes con respecto a algunas características:

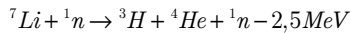
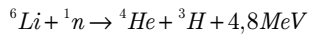
- La forma más constante del tokamak con respecto al stellarator hace que los plasmas sean más estables desde el punto de vista hidrodinámico.
- El stellarator, por otro lado, es capaz de trabajar en modo continuo en lugar de pulsado, lo que mejora la posibilidad de crear una central de producción con buen rendimiento.
- La forma de generar el campo poloidal en un tokamak produce mayores valores de confinamiento, lo que se relaciona directamente con la potencia específica del reactor.
- La contrapartida del punto anterior se da en el stellarator, donde la baja intensidad de la corriente toroidal favorece la ausencia de interrupciones. Las interrupciones con los ELMs requieren máxima atención en el desarrollo de la tecnología tokamak.
- Desde un punto de vista constructivo, con todas sus implicaciones de



mantenimiento, el stellarator es un reactor mucho más complicado que su hermano tokamak.

4. CICLO DE COMBUSTIBLE DE UN REACTOR DE FCM

El tritio es un elemento de corta vida que no se encuentra de forma natural en la Tierra en las cantidades necesarias. Por ello, dentro de un reactor de fusión, el tritio será producido a partir de litio, que es un metal ligero y abundante. En el caso de ITER, la generación del tritio tendrá lugar dentro del propio reactor mediante el uso de los mantos reproductores (del inglés *breeding blanket*). Por cada reacción D - T del plasma se emite un neutrón que generará tritio al interaccionar con el litio del manto según las ecuaciones:



El combustible debe generarse en el mismo reactor, por lo que el desarrollo de esta tecnología resulta crítico para demostrar la viabilidad de la FCM.

Debido a su importante valor estratégico para el programa de fusión, los distintos miembros que participan del diseño de ITER (UE, Japón, Rusia, Estados Unidos, China, Corea y la India) planean probar distintos módulos de *breeding blankets* en ITER.



4.1 LA PLANTA DE TRITIO

El ciclo de combustible de una planta de tritio (ver figura 3.12) se puede dividir en dos circuitos:

- **Circuito primario:** En el que se procesa la corriente del gas tritiado que sale de la cámara del reactor.
- **Circuito secundario:** En el que se regenera y se extrae el tritio que se reinyecta en el circuito primario para ser procesado.

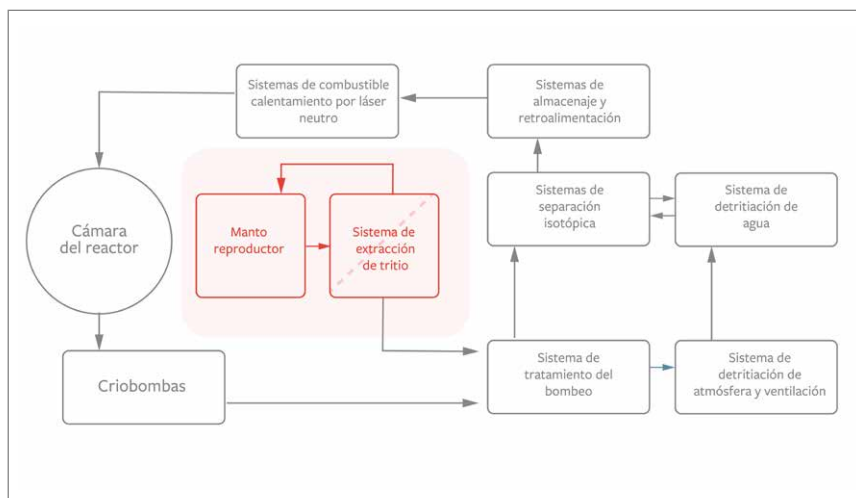


Figura 3.12 Esquema de una planta de tritio

El circuito primario es el que contiene todos los gases que se extraen de la cámara del reactor. Cuenta con numerosos sistemas auxiliares (sistemas de alimentación, bombeo y detritiación, etc.), cuyo diseño se basa en los siguientes criterios básicos:

- Minimización de los inventarios de tritio
- Desactivación de los efluentes radiactivos
- Minimización de los residuos y de los costes del ciclo de tritio



El circuito secundario es el que contiene el *breeding blanket*. Es aquí donde el tritio será regenerado mediante reacciones nucleares entre neutrones y litio, como ya se ha explicado con anterioridad. El nuevo tritio creado debe ser extraído para posteriormente ser reinyectado en el circuito primario.

4.2 MANTO REPRODUCTOR O *BREEDING BLANKET*

La misión fundamental del manto reproductor (ver figura 3.10) es la recuperación de energía de los neutrones de la cámara de reacción ($14,1\text{ MeV}$), minimizando las fugas de neutrones y aumentando la energía útil recuperada de la fusión. También está concebida para proteger las bobinas y otros componentes y, como gran objetivo, para conseguir la autosuficiencia con respecto al tritio.

Actualmente existen dos líneas de diseño de los módulos del manto reproductor en la Unión Europea: HCLL por sus siglas del inglés: Helium-Cooled Lead-Lithium (Litio Plomo refrigerado por Helio) y HCPB por sus siglas del inglés: Helium Cooled Pebble Bed (Lecho de bolas refrigerado por Helio), que se probarán juntos en uno de los puertos ecuatoriales de ITER. En las figuras 3.13 y 3.14 se muestran ambos modelos.

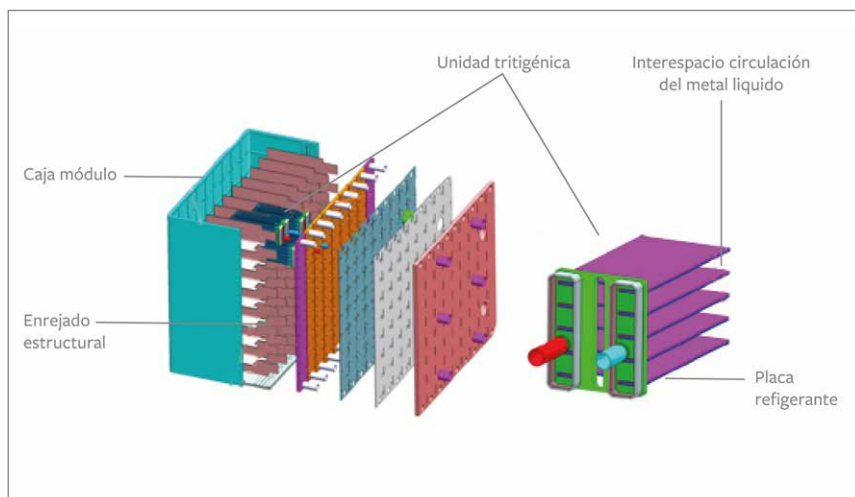


Figura 3.13 HCLL (*Helium-Cooled Lead-Lithium*)



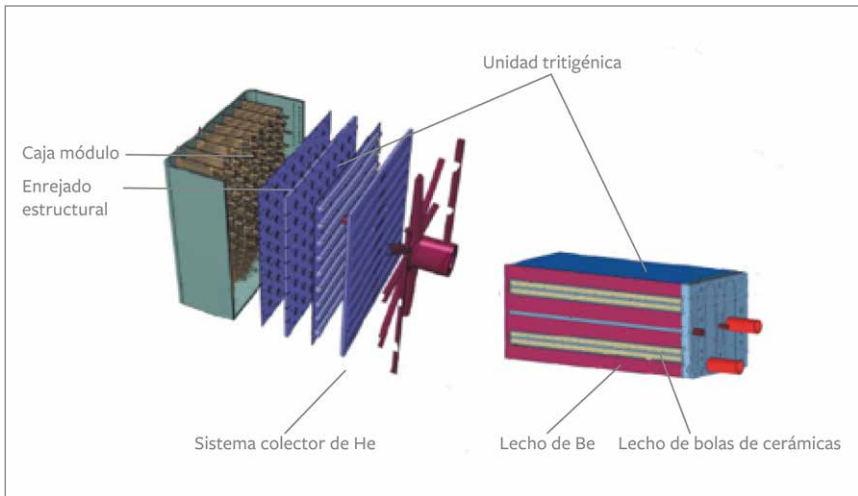


Figura 3.14 HCPB (*Helium Cooled Pebble Bed*)

5. CONCLUSIONES

Para alcanzar las condiciones de ignición, es preciso confinar la materia que constituye el combustible en estado de plasma durante un tiempo y con una densidad adecuados. El confinamiento magnético utiliza la fuerza de Lorentz para desviar la trayectoria de las partículas del plasma y mantenerlas en el sistema. Debido a las fuerzas electromagnéticas implicadas, no es suficiente el campo toroidal para confinar el plasma, y se hace preciso modificar éste con una componente poloidal. Es en el método seguido para generar esta componente donde reside la principal diferencia entre las dos tecnologías principales: el tokamak y el stellarator. Ambas apuestan por densidades bajas del plasma durante tiempos considerables.

ITER es uno de los mayores proyectos experimentales a nivel mundial, que pretende demostrar que se puede obtener ganancia energéticamediante la FCM a partir del diseño conocido como tokamak.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] <https://www.iter.org/mach>
- [2] J. M. Perlado y O. Cabellos, “Fusión nuclear”, Máster de Ciencia y Tecnología Nuclear de Universidad Politécnica de Madrid, 2009
- [3] International Atomic Energy Agency, Summary of the ITER final design report, July 2001,
- [4] Design requirements and guidelines level1, G A0 GDRD 2 01-07-13 R 1.0
- [5] N. Moral, D. Garoz, O. Gonzalez-del Moral, J. Álvarez, J. M. Perlado, “Tritium diffusion challenges for future nuclear fusion reactors”, 25th Symposium on Fusion Engineering, IEEE 10-14 June 2013 doi: 10.1109/SOFE.2013.6635392.
- [7] Some Criteria for a useful thermonuclear reactor. J. D. Lawson 1955. Atomic Energy Research Establishment, Harwell, Berkshire, U. K.

BIBLIOGRAFIA DE FIGURAS

- [3.1] Elaboración propia
- [3.2] Elaboración propia en base a: Dominio público, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fusion_tripleprod.svg
- [3.3] Elaboración propia
- [3.4] Elaboración propia
- [3.5] Elaboración propia
- [3.6] Tomada de: Seminarios de Fusión Nuclear, JJNN
- [3.7] Elaboración propia en base a: <https://www.iter.org/>
- [3.8] Tomada de: Seminarios de Fusión Nuclear, JJNN
- [3.9] Elaboración propia en base a : Dominio público, <http://www.fusionscience.org/technical/ASslides/ASslides.html>
- [3.10] Elaboración propia en base a: <https://www.iter.org/>
- [3.11] Tomada de: Max-Planck Institut für Plasmaphysik https://commons.wikimedia.org/wiki/File:W7X-Spulen_Plasma_blau_gelb.jpg
- [3.12] Elaboración propia
- [3.13] Tomada de: <https://www.iter.org/>
- [3.14] Tomada de: <https://www.iter.org/>



4 - FUSIÓN POR CONFINAMIENTO INERCIAL

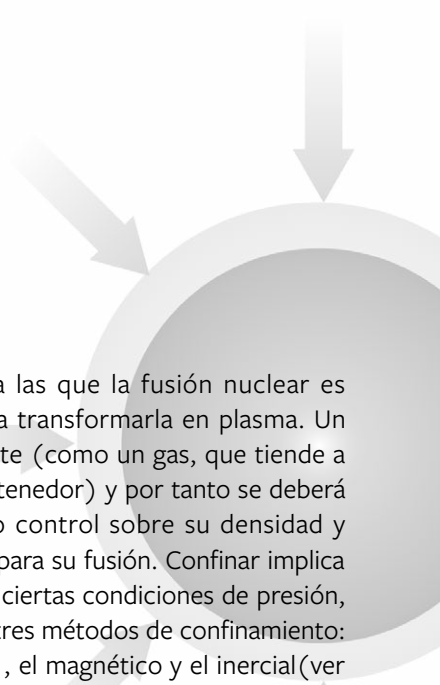
Alejandro Carrasco Sánchez
Autor

Manuel Coto Ferreiro
Revisor

1. INTRODUCCIÓN

Para conseguir alcanzar las temperaturas a las que la fusión nuclear es posible, se necesita calentar la materia hasta transformarla en plasma. Un plasma siempre tiende a expandirse libremente (como un gas, que tiende a ocupar siempre la totalidad de su recinto contenedor) y por tanto se deberá confinar el plasma para mantener un cierto control sobre su densidad y conseguir obtener las condiciones necesarias para su fusión. Confinar implica invertir energía en mantener el plasma a unas ciertas condiciones de presión, densidad y temperatura. Existen básicamente tres métodos de confinamiento: el gravitatorio (el que ocurre en las estrellas), el magnético y el inercial (ver capítulo 2 apartado 6). El último será el estudiado en este capítulo.

En este capítulo se comenzará estudiando la física del proceso de FCI (Fusión por Confinamiento Inercial) y sus tecnologías en el apartado 2. Se continuará con explicaciones más detalladas de los diferentes esquemas utilizados en FCI y se introducirá el esquema que tendría una planta FCI, respectivamente en los apartados 3 y 4.



2. FÍSICA DE LA FCI

Antes de poder continuar con la FCI, será necesario repasar ciertos conceptos físicos que son de especial relevancia en este campo.

2.1 PROCESO DE IGNICIÓN

En el proceso de ignición en la FCI (también ICF o *Inertial Confinement Fusion* por sus siglas en inglés), una cápsula que contiene en su interior el combustible (deuterio y tritio) se comprime por la aceleración que sufre debido a la absorción de gran cantidad de energía. Esta energía se deposita mediante una fuente denominada sistema accionador o *driver*, que consigue que la cápsula pase a estado de plasma, desplazándose así hacia el exterior. Por acción-reacción (o conservación del momento cinético) el combustible se ve empujado hacia dentro, comprimiéndose. La transformación directa de sólido a plasma que sufre la cápsula se denomina ablación.

Esta compresión consigue que parte del combustible comience a fusionar, lo cual se asimilará a una ignición del combustible, utilizando como vocabulario común para describir la reacción palabras como “quemado” o “ignición”. El proceso más básico de ignición por confinamiento inercial se denomina ignición tradicional o central y es el que se describe en este apartado, para más tarde pasar a describir diferentes conceptos (o esquemas) avanzados de ignición que evolucionan a partir de éste. Además, la cápsula o aquello que recibe la energía del *driver* en cada esquema investigado se denomina “blanco de fusión”. En el esquema de ignición tradicional este blanco consiste en una cápsula con un diámetro de unos milímetros, que contiene en su interior el combustible. La parte exterior de la cápsula se denomina *ablator* y la interior *pusher* debido a la función que cumplen cada uno en el proceso descrito más abajo.

Este proceso se puede diferenciar en cuatro etapas, como ilustra la figura 4.1:

- Depósito de energía sobre la cápsula que encierra el combustible. La cápsula se calienta rápidamente, llegando a temperaturas del orden de keV (decenas de millones de Kelvin) y comenzando a ablacionar la parte exterior o *ablator* de la cápsula.



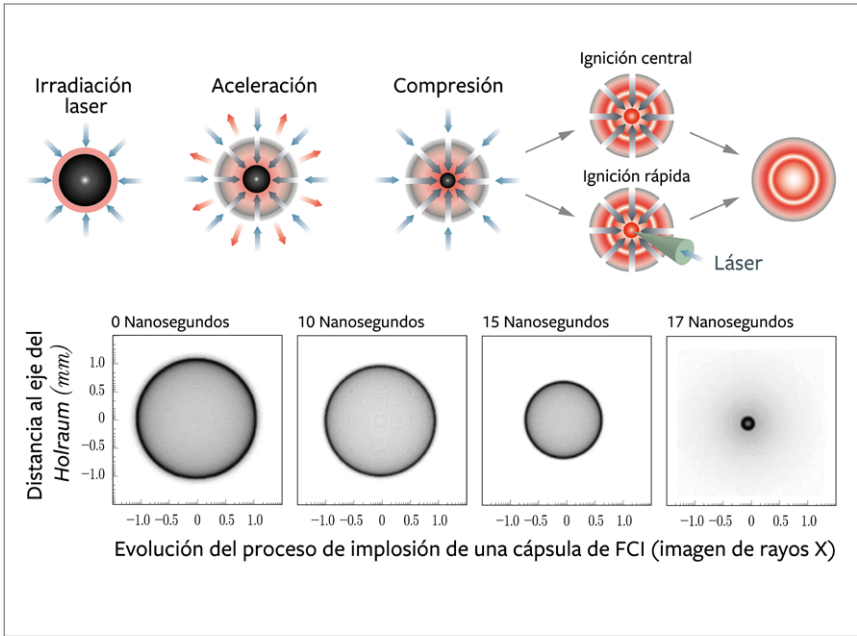


Figura 4.1 Etapas del proceso de FCI con ignición central o *hot-spot ignition*

- La capa exterior de la cápsula pasa a estado de plasma y es acelerada radialmente hacia el exterior. Por conservación del momento cinético o ley de acción-reacción el combustible interior es empujado hacia dentro por la parte interior de la cápsula denominada *pusher*.
- El *pusher* es calentado por la capa exterior y se expande, incluso llegando a evaporarse también, pero afectando al interior de la cápsula en el proceso, comprimiéndolo y llevándolo a presiones del orden de millones de atmósferas. En un instante posterior, el combustible es comprimido por las capas más exteriores. La compresión lleva al combustible a densidades del orden de cientos de g/cm^3 [1] comenzando la ignición. Como orden de magnitud conviene citar que la densidad del hidrógeno líquido es de $0,1 g/cm^3$ a $0^\circ C$ y la de un metal pesado es de $10 g/cm^3$, por tanto la compresión buscada en el combustible es muy elevada, de casi 2000 veces la densidad del hidrógeno en condiciones estándar.
- Ignición y propagación de una onda de quemado al resto del combustible



comprimido y frío, produciendo energía en forma de energía cinética de las partículas producidas en la reacción de fusión. En un sistema de FCI nuestro objetivo será quemar en torno a un tercio de los 3 *mg* de combustible D - T contenidos en la cápsula, lo que liberará en torno a 400 *MJ* de energía. Para tener una idea del orden de magnitud de energía del que estamos hablando, la combustión de una tonelada (1000 *kg*) de TNT produce una energía de 4,2 *GJ*. La bomba nuclear lanzada sobre Hiroshima en 1945 (equivalente a 10 kilotoneladas de TNT) liberó una energía de 42 *TJ*. El quemado de en torno a un 1 *mg* de combustible deuterio-tritio resulta en una energía algo menor que 100 *kg* de TNT.

2.2 ONDAS DE CHOQUE

En mecánica de fluidos las ondas de choque son ondas de presión que viajan a velocidades superiores a la velocidad del sonido en el medio. En FCI los láseres calientan y comprimen la capsula mediante ondas de choque. La energía transmitida por los láseres a la cápsula produce un aporte tal de energía que se produce una onda de choque que avanza por el material, transmitiéndole la energía depositada. Estas ondas tienen unas ciertas propiedades que deben de tenerse en cuenta a la hora de diseñar el proceso de ignición, por ejemplo, suele resultar más interesante comprimir la cápsula utilizando varias ondas de choque en lugar de una sola.

2.3 INTRODUCCIÓN AL CONCEPTO DE LÁSER

Todos los sistemas de láseres se basan en el principio de la emisión estimulada de una onda electromagnética a través de los fenómenos de la excitación y la inversión de la población. De hecho, la palabra láser surge del acrónimo inglés de esta definición *“light amplification by stimulated emission of radiation”*.

Un electrón, al absorber la energía incidente de un fotón puede “saltar” a un nivel de energía superior, encontrándose en un estado excitado. Más tarde, al retornar al equilibrio, este mismo electrón desciende de nivel energético, emitiendo una onda de luz con la energía que ganó al hacer el “salto”. La teoría cuántica predice que estos niveles de energía son discretos y en un láser lo que



se hace es repetir este proceso de excitación y desexcitación entre dos niveles concretos. La desexcitación de los electrones es causada por una onda de luz, consiguiendo así emitir luz coherente de la misma longitud de onda que la onda inicial. Esta onda de luz es más tarde amplificada, generando un haz de luz coherente espacial y temporalmente. La coherencia espacial se corresponde con la capacidad de un haz para permanecer con un tamaño pequeño al transmitirse por el vacío en largas distancias y la coherencia temporal se relaciona con la capacidad para concentrar la emisión en un rango espectral muy estrecho.

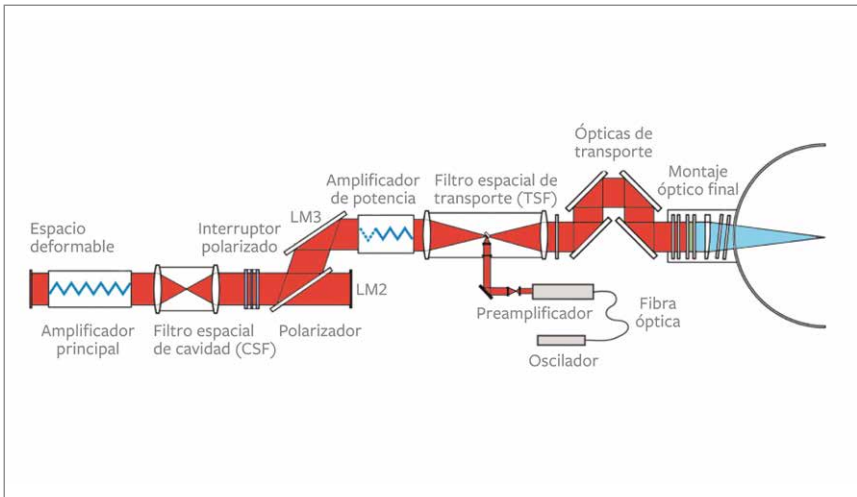


Figura 4.2 Estructura del láser Nd de NIF

El láser es el vector que transmite la energía al blanco en FCI. Los láseres más utilizados actualmente para producir condiciones de alta densidad de energía son los que extraen energía de un cristal dopado con neodimio (Nd), y se incluyen dentro de la categoría de láseres de estado sólido. La máxima expresión de este tipo de láser se encuentra en el proyecto NIF (*National Ignition Facility*). Esta iniciativa estadounidense es el máximo exponente actual de la investigación en FCI (ver capítulo 8, apartado 5). Podemos observar la estructura de su láser en la figura 4.2.

En estos láseres, se introduce neodimio trivalente (Nd(III)) en un cristal



YAG (*Yttrium Aluminium Garnet*), que sustituye a un pequeño porcentaje (1%) de los átomos de itrio al tener ambos átomos un tamaño similar. Son los electrones de este átomo de Nd los que se excitarán y emitirán luz de la longitud característica de 1064 nm.

La alternativa más importante a los láseres de cristal Nd son los láseres de fluoruro de kriptón, KrF. Estos son láseres de excímero, que emiten a 248 nm en la región ultravioleta mediante la excitación de una mezcla de gases nobles y un gas halógeno. Un ejemplo de un láser KrF es el proyecto Elektra del NRL (*Naval Research Laboratory*) estadounidense.

2.4 ÓPTICAS DE ENFOQUE

Podría parecer una tarea simple enfocar la luz de un láser de alta intensidad, al igual que una simple lupa puede enfocar la luz del sol y empezar un fuego. Sin embargo, el punto de enfoque producido por una lente simple es muy poco uniforme y no cumple los criterios buscados en el confinamiento inercial, debido a que el pulso generado contiene en sí mismo perturbaciones.

La solución adoptada para producir una iluminación uniforme con un láser de baja intensidad es la de producir un perfil gaussiano de intensidad, que puede reproducirse mediante un sistema óptico manteniendo una calidad aceptable. En un láser de alta intensidad un perfil gaussiano conllevaría una gran pérdida de energía, pues la mayoría del haz se sitúa en zonas de baja intensidad, necesitándose por tanto un perfil más plano de intensidad.

La solución a este problema pasa por un sistema de enfoque: un sistema de cientos a miles de elementos ópticos adyacentes y típicamente hexagonales que dividen el rayo en pequeños haces de luz. En los inicios se utilizaba el sistema RPP (*Random Phase Plate*) en el que estos elementos ópticos tienen un espesor aleatorio. Estas técnicas evolucionaron hacia el sistema DPP (*Distributed Phase Plate*) en el que un mayor control de cada elemento permite modificar la forma del punto de iluminación resultante, consiguiéndose un perfil de intensidad más plano.

Estos métodos producen un perfil más plano pero con pequeños picos de intensidad, como se puede observar en la figura 4.3. Un plasma es un gran conductor de calor, lo cual tenderá a aplanar estos picos de intensidad. Estos picos



son, sin embargo, solo aceptables en esquemas de ignición indirecta (ver apartado 3.3), debido al excesivo crecimiento de las inestabilidades producidas por la iluminación directa del blanco.

En los esquemas de ignición directa la solución encontrada es la de desplazar a lo largo del tiempo de iluminación de la cápsula estos picos de posición física, mediante la introducción de incoherencia en el haz, consiguiéndose así a lo largo del tiempo un perfil promedio mucho más suave que el original. Este método se conoce como ISI (*Induced Spatial Incoherence*) y ha resultado muy prometedor utilizándose con láseres KrF.

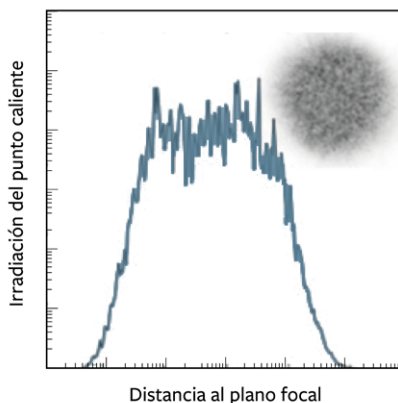


Figura 4.3 Perfil espacial de intensidad producido por una óptica DPP.

3. ESQUEMAS DE CONFINAMIENTO INERCIAL

En el apartado 2.1 se ha hecho referencia al proceso general de ignición. En este apartado se introducirán los conceptos de ignición por punto caliente o hot-spot y por qué este es necesario (apartado 3.1), qué condiciones termodinámicas son necesarias para alcanzar la ignición (apartado 3.2) y los esquemas siguientes:

- Esquema de ignición directa o ignición indirecta (apartado 3.3).
- Esquema de ignición tradicional o ignición rápida (apartado 3.4).
- Introducción al Z-pinch (apartado 3.5).

3.1 IGNICIÓN CENTRAL CON PUNTO CALIENTE O *HOTSPOT*



En primer lugar se discutirá por qué es necesaria una ignición con un punto caliente central en la cápsula desde un punto de vista energético. En este apartado y el siguiente se citarán los datos de [1] y [5] a los que se puede acudir para ver con más profundidad los cálculos seguidos para obtenerlos.

Energía necesaria - Caso de compresión de toda la masa de combustible:

A lo largo del capítulo se hablará de combustible frío pero comprimido, cuando el combustible se encuentre en condiciones idóneas de compresión pero se requiera un calentamiento para su ignición, y de combustible caliente comprimido cuando esté en condiciones de ignición.

La energía interna del D - T frío comprimido es de 10^7 J/g y la energía que esperamos obtener de la reacción es de $1,8 \cdot 10^{11} \text{ J/g}$, es decir, obtendríamos una ganancia de 18000. Sin embargo, para conseguir la ignición se necesitaría calentar a 5 keV (58 millones de Kelvin) aparte de comprimir, y la energía interna del D - T comprimido a 5 keV es de $6,4 \cdot 10^8 \text{ J/g}$, lo que proporciona una ganancia de en torno a 300. Esta ganancia es muy inferior a la requerida, y además en la actualidad no se poseen *drivers* capaces de proporcionar estos niveles de energía. Por tanto parece que no es viable calentar todo el combustible si se busca producir energía eléctrica con la fusión.

Energía necesaria - Caso de compresión central o Hotspot:

En el cálculo anterior se ha supuesto que se calentará toda la masa de combustible, elevando la temperatura y presión de toda la masa hasta alcanzar la ignición en toda ella a la vez.

En dicho cálculo se ignora el efecto de las partículas alfa, que se producen en la reacción de fusión y cuya energía se deposita principalmente en el propio combustible comprimido y por tanto puede crear una onda de quemado que se propaga por el combustible. De esta forma, con conseguir las condiciones de ignición en un *hotspot* o punto caliente de radio mucho menor que el del combustible sería suficiente. La energía extra requerida para obtener la ignición de esta manera sería de $6,4 \cdot 10^8 \text{ J/g}$ en un volumen muy reducido de la cápsula y por tanto en todo el volumen de la cápsula sería de media de $6,4 \cdot 10^5 \text{ J/g}$ suponiendo un radio de *hotspot* diez veces menor al de la cápsula.

Este número sí resulta interesante para producir electricidad, pues es muy inferior a la ganancia de compresión.

De la discusión anterior se concluye que en fusión inercial siempre será



necesario un encendido gradual del combustible, con algún tipo de punto caliente. La solución más explorada para crear este punto caliente es la de conseguir que la compresión creada en la ablación de la cápsula lo forme en el centro de esta.

3.2 CONDICIONES NECESARIAS PARA LA IGNICIÓN.

El objetivo de este apartado es caracterizar las condiciones necesarias para quemar el combustible de forma autosostenida.

En la figura 4.4 podemos ver una tabla con las condiciones estándar para una ignición central con punto caliente. Cabe notar que han de alcanzarse temperaturas de 5 keV y presiones de 200 Gbar (200 000 millones de veces la presión atmosférica) en una esfera de radio en torno a $50\text{ }\mu\text{m}$ que constituirá el punto caliente.

Parámetro	Valor
Masa de combustible	3 mg
Fracción de quemado	33%
Densidad superficial del combustible	3 g/cm^2
Densidad final del combustible	970 g/cm^3
Radio exterior del combustible	$88\text{ }\mu\text{m}$
Radio del punto caliente	$57\text{ }\mu\text{m}$
Temperatura del punto caliente	5 keV (58 millones de K)
Presión del combustible	200 Gbar
Entropía máxima del combustible frío	$4 \cdot 10^8\text{ J/keVg}$
Energía del combustible comprimido	93 kJ
Energía cinética de la cápsula	$> 190\text{ kJ}$
Velocidad de implosión	$> 3,5 \cdot 10^5\text{ m/s}$

Figura 4.4 Tabla con los parámetros típicos para conseguir la ignición central [1]



El quemado que se alcanzará en el combustible es una cantidad fundamental que ha de estudiarse y que nos indica la cantidad de combustible que se fusionaría si se comprimiera y calentara una cierta masa de D - T. La fracción de quemado del combustible depende del producto ρr (kg/m^2) siendo ρ la densidad del combustible comprimido (kg/m^3) y r el radio final del combustible comprimido.

El diámetro inicial de una cápsula de fusión es del orden del mm y se comprime hasta una r de μm , mil veces menor. En términos de volumen, esto implica una compresión de un factor 10^{-9} .

Como se menciona en el apartado 2.1 se busca producir unos $400 MJ$ de energía, lo cual equivale a utilizar $3 mg$ de combustible por cápsula.

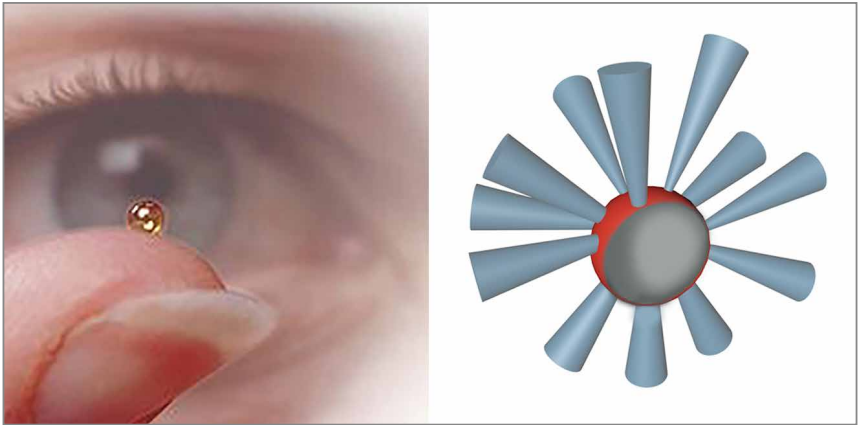


Figura 4.5 Tamaño de una cápsula de D - T (izda.). Esquema de la ignición directa (dcha.)

3.3 ESQUEMAS DE IGNICIÓN DIRECTA E INDIRECTA.

El esquema de ignición directa es el descrito hasta ahora: un láser ilumina directamente una cápsula llevándola a la ignición. En un esquema de fusión indirecta el láser ilumina un segundo contenedor y es éste el que produce la energía necesaria para iluminar la cápsula y llevarla a ignición. Llamaremos blanco de fusión a aquello iluminado por el láser.



Prácticamente el único sistema utilizado en ignición indirecta es el *hohlraum* (del alemán, cavidad). Éste consiste en un cilindro de largo normalmente inferior al *cm*. El láser ilumina el *hohlraum*, entrando en su interior por una ventana en cada lateral del cilindro, calentando así sus paredes interiores. Este cilindro está formado por un material de elevado número másico, como oro o plomo. Al ser iluminado por el láser el cilindro emite rayos X que a su vez impactan sobre la cápsula de fusión que se encuentra en el interior del cilindro.

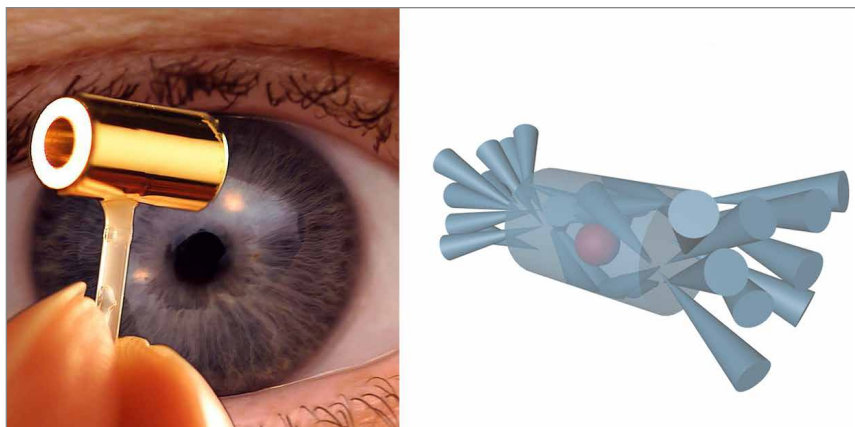


Figura 4.6 Tamaño de un *hohlraum* (izda.). Esquema de la ignición indirecta (dcha.)

También existen variantes en las que el láser impacta directamente contra la superficie exterior de un *hohlraum* de pared fina, pero esta opción es mucho menos común.

La elección entre esquemas de fusión directa e indirecta sigue siendo a día de hoy una de las discusiones más recurrentes en la fusión inercial. Esta decisión es complicada porque influyen en ella factores muy diversos, desde la fabricación del blanco o la geometría de la cámara de fusión, hasta la mecánica de inyección del blanco, etc. Además, la eficacia de cada blanco depende del láser usado para iluminarlo, por lo que tradicionalmente se elige si realizar ignición directa o indirecta en función del láser utilizado, complicando aún más la tarea de discernir cuál de los dos métodos es objetivamente mejor. La mayor ventaja de la ignición directa es la mayor eficiencia que consigue en la transferencia de energía del láser al combustible. En la ignición indirecta gran parte de esta energía se pierde en el calentamiento intermedio. Por ejemplo,



en el caso de un *hohlraum* menos de la mitad de la energía que llega al blanco queda disponible como rayos X para calentar la cápsula.

Una ventaja secundaria de la ignición directa es la mayor simplicidad química del blanco. Por otro lado, la mayor ventaja de la ignición indirecta es su facilidad para conseguir una iluminación uniforme y simétrica de la cápsula. Idealmente, la forma de la cápsula comprimida ha de ser esférica. Si, por ejemplo, la potencia del láser es ligeramente superior en los polos, la forma final de la cápsula comprimida será ovalada, como la de un balón de *rugby* (ver capítulo 5, figura 5.5). Cabe imaginarse que para los niveles de energía y las pequeñas distancias de las que estamos hablando mantener esta uniformidad no es tarea fácil, es de hecho uno de los mayores retos de la FCI. Este tipo de asimetrías ocurren en esquemas de ignición directa e indirecta, pero en iluminación indirecta con un *hohlraum* se aumentan enormemente las tolerancias admisibles en el alineamiento del láser, permitiéndose tolerancias cuatro veces mayores.

Otra gran ventaja de la ignición indirecta es que aunque complique la extracción del blanco de la cámara de ignición, la cobertura del *hohlraum* ofrece una cierta protección térmica y mecánica de la cápsula de fusión durante el proceso de entrada a la cámara.

3.4 ESQUEMAS DE FUSIÓN TRADICIONAL Y RÁPIDA.

Una metáfora muy utilizada para ilustrar la fusión rápida es la de comparar un motor de gasolina o encendido provocado (análogo a la fusión rápida) con uno diésel o de encendido por compresión (análogo a esquemas con ignición central).

En un motor diésel el combustible es comprimido por el pistón hasta causar su ignición. De igual manera, en la fusión inercial tradicional o con ignición central mediante un láser se comprime una cápsula que contiene en su interior el combustible y se continúa comprimiendo con la misma fuente de energía hasta que en su interior se produce un punto caliente y en él se produce la ignición del combustible de fusión.

Sin embargo en un motor de gasolina en primer lugar el pistón comprime el combustible, pero la ignición la causa una chispa de la bujía. Igualmente, en la fusión rápida se utiliza una fuente de energía para comprimir el blanco y



otra para producir la ignición una vez que este está comprimido, esta segunda fuente (o segundo *driver* de energía) sería la “chispa” que produce la ignición y suele ser un segundo láser de muy alta intensidad y pulso muy corto. El primer *driver* puede ser de tipo directo o indirecto, pudiendo utilizarse un *hohlraum*.

En fusión rápida por tanto, el punto caliente producido no tiene por qué ser central a la cápsula; se puede producir en un lateral de esta, donde se absorberá la energía del segundo *driver* al impactar contra la cápsula.

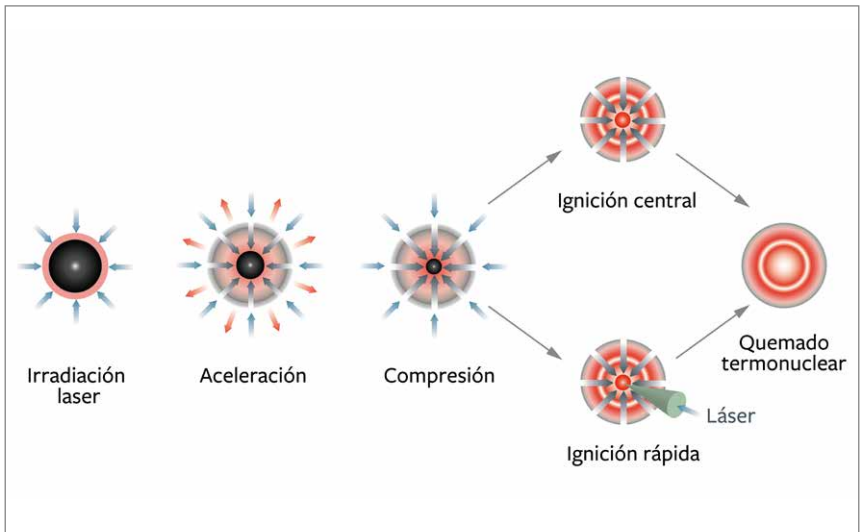


Figura 4.7 Esquemas de ignición central o tradicional y rápida

Este esquema de ignición tiene tres principales ventajas respecto a los anteriores:

- Ofrece una mayor ganancia de energía al reducirse la utilizada para comprimir el blanco.
- Aporta mayor flexibilidad al separar las etapas de compresión y de ignición. En ignición rápida se pueden crear *drivers* optimizados para cada una de las dos etapas de elevación de energía, mientras que en una ignición tradicional se siguen los procesos de compresión e ignición



utilizando la misma fuente, requiriendo esto llegar a un compromiso entre procesos con diferentes necesidades.

- Como ya se ha comentado el proceso tradicional de ignición requiere mantener una geometría muy precisa antes de la implosión y una elevada simetría. Estos dos requerimientos son mucho menos estrictos en la ignición rápida. En un esquema de ignición rápida, mientras se consiga suministrar la energía suficiente en el punto en el que se necesita, el quemado del combustible se propagará.

Existen numerosas propuestas de esquemas para producir la fusión por ignición rápida. Uno de los primeros fue el introducido por R. Kodama en [7] que incluye un cono de oro para proteger la entrada de un pulso láser de alta intensidad a la cápsula, que actuará como segundo *driver*. En este esquema ya se observaron experimentalmente reducciones de la energía necesaria de hasta la mitad de su valor.

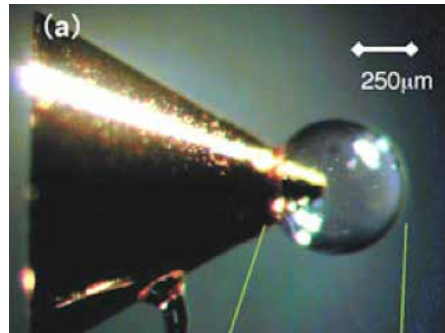


Figura 4.8 Esquema propuesto por R. Kodama en [7]

3.5. INTRODUCCIÓN AL Z-PINCH

El efecto *pinch* consiste en la compresión de un hilo conductor mediante fuerzas magnéticas. Un Z-pinch se denomina así porque la corriente que viaja por el hilo es axial (de dirección z en coordenadas cilíndricas) y el campo magnético es azimutal. En la naturaleza el *pinch* ocurre espontáneamente en fenómenos tan diversos como los rayos de una tormenta, la aurora boreal o las fulguraciones solares. En sus aplicaciones para fusión nuclear el conductor es un plasma, que es comprimido por el campo magnético generado por la corriente que lo atraviesa. En una aplicación clásica de la fuerza de Lorentz (ver tema 3, apartado 3.1) dos cables conductores que transportan una corriente en la misma dirección tienden a desplazarse el uno hacia el otro. Si ahora

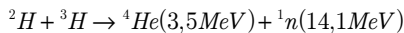


asimilamos un plasma a muchos hilos conductores de corriente llegamos a la conclusión de que si este es recorrido por una corriente eléctrica el plasma tenderá a comprimirse. Para comprender por qué el Z-pinch es considerado como confinamiento inercial y no magnético debemos definir claramente los dos conceptos de confinamiento. En el confinamiento magnético, los iones se retienen en el plasma porque un campo magnético les impone trayectorias que los encierra en un volumen. En el confinamiento inercial las partículas tienen velocidades convergentes hacia un punto o línea y por tanto es su propia inercia la que permite confinarlas, independientemente de la naturaleza de la fuerza que haya iniciado el movimiento. Por lo tanto en un Z-pinch se produce confinamiento inercial logrado mediante un campo magnético. El SNL (*Sandia National Laboratory*) en EE. UU. es el principal centro de investigación de la tecnología Z-pinch. El concepto que se está investigando se denomina MagLIF (*Magnetized Linear Inertial Fusion*) en el que un campo magnético se utiliza para colapsar un cilindro metálico que contiene el combustible.

4. ESQUEMA DE UNA CENTRAL DE FCI Y GANANCIA DE ENERGÍA NECESARIA

El objetivo de este apartado es comentar las diferencias principales entre cómo sería una central nuclear de FCI y de FCM. Ya se ha realizado una descripción general de la primera en el capítulo 3, apartado 1.1, en el que se describen los procesos físicos de recuperación del calor de reacción generado que también aplican en este caso, por tanto este apartado se centrará más en la tecnología de la planta.

La ecuación de la reacción D - T muestra que se producen neutrones y partículas alfa:



Las partículas alfa no llegan a escapar del combustible comprimido debido a su limitado alcance a esas densidades, y por tanto estas serán las encargadas de calentar el combustible frío una vez iniciada la ignición, consiguiendo mantener la reacción. Mientras, los neutrones escaparán y será su energía la



que buscamos aprovechar para generación eléctrica.

En la figura 4.9 se puede observar un esquema simplificado de una hipotética planta de FCI. Como ya se ha comentado, en un reactor nuclear de fusión los neutrones depositarían su energía en la cámara de reacción, calentando un circuito hidráulico y produciendo energía aprovechable que más tarde se convertiría en electricidad.

Envolviendo a la cámara de reacción existe un manto de litio que produce tritio a través de reacciones de absorción neutrónica, consiguiendo establecer así un ciclo de producción de tritio en el interior del reactor. Este concepto ya se ha comentado más en detalle en el capítulo 3, apartado 4. Se pueden apreciar los flujos de una planta de FCI en la figura 4.10.

Sin embargo, una planta de FCI no debe simplemente quemar una cápsula de combustible y absorber su energía. El objetivo de una planta es producir un flujo continuo de energía por unidad de tiempo, es decir, potencia. Para ello una planta debe tomar los blancos y crear un ciclo de igniciones por unidad de tiempo.

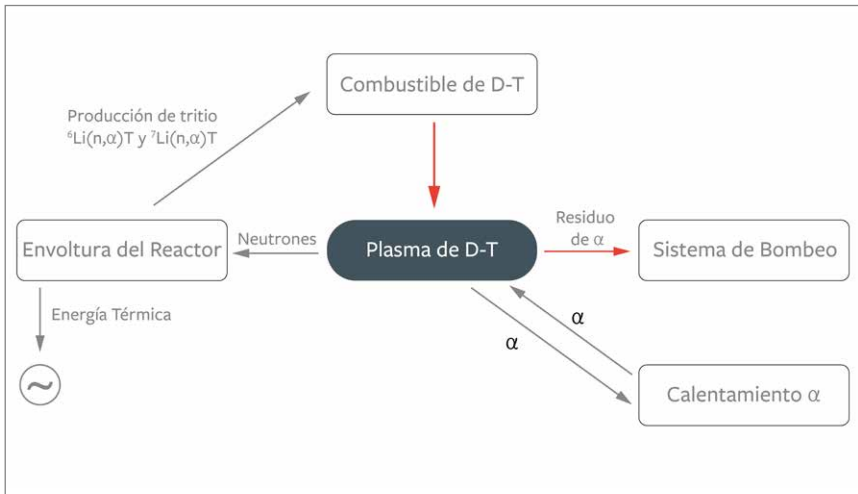


Figura 4.9 Flujos de materia y energía que habría en un reactor nuclear de fusión inercial

La particularidad de una central de fusión inercial es que las cápsulas son sistemas independientes y aislados los unos de los otros y por tanto ha de establecerse una producción de cápsulas (o blancos) que entren al reactor



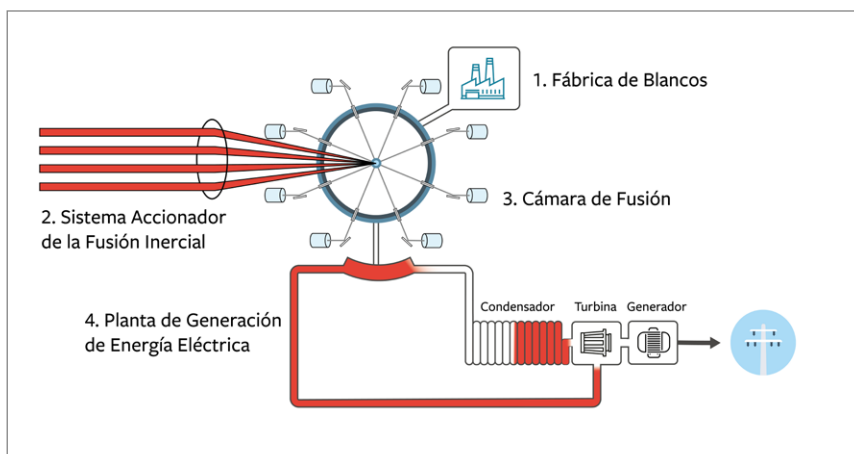


Figura 4.10 Esquema básico de una planta de fusión nuclear por confinamiento inercial

(ver figura 4.10), produzcan ignición y salgan de él para dar paso a la siguiente. En la fábrica de blancos se producirán anualmente unos 10^7 a 10^8 blancos.

El número citado habitualmente de ganancia requerida para estudiar la viabilidad de una central es el de la ganancia esperada o ganancia en planta Q^I . Esta se define como el ratio entre la potencia eléctrica producida y la requerida para mantener la planta en funcionamiento. Para que una planta eléctrica sea viable se requiere una Q mayor o igual a 10. Esto implica que se requiere un factor 100 en el cociente entre energía producida por los neutrones salientes de la reacción y energía eléctrica gastada en producir la reacción.

O lo que es lo mismo, una ganancia superior a 2500 en el cociente entre energía producida por los neutrones salientes de la reacción y la energía interna del combustible (producida por los láseres que funcionan con la energía eléctrica anterior) para que la fusión fuese viable como fuente de producción eléctrica. Esta ganancia se denomina ganancia en blanco.

Uniendo estos dos razonamientos se concluye que con una ganancia de 250 en este último cociente se conseguiría el punto de equilibrio en electricidad, es decir, el punto en que se produce tanta energía eléctrica como energía se requiere para operar la planta, $Q = 1$.

Este número no ha de confundirse con el *break even* del combustible, valor alcanzado en NIF en el que se obtiene tanta energía del blanco como la

1 No debe confundirse con la Q de la reacción relacionada con el defecto de masa (ver capítulo 1, apartado 5)



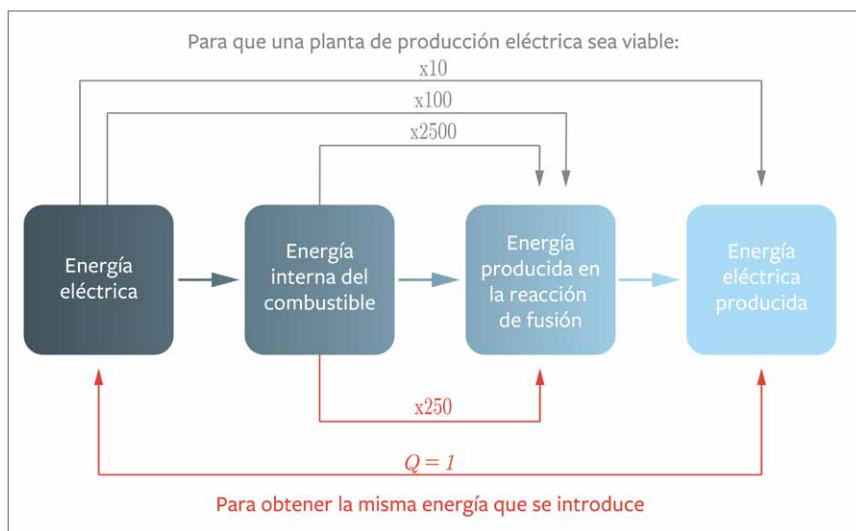


Figura 4.11 Rendimientos requeridos para las energías o potencias en una planta

energía que el láser ha depositado en él. Es decir, en NIF se ha conseguido experimentalmente hacer que el segundo cociente comentado valga 1, pero habría que multiplicarlo por 100 para que la fusión por confinamiento inercial fuese viable comercialmente.

Estos números tan elevados se deben a los diversos rendimientos que ha de cubrir el proceso, siendo el más notable la reducida eficiencia de transmisión de energía del láser, que es de entre el 1% (para láseres de estado sólido como NIF) y el 6% (para láseres KrF). En el apartado 2.1 de este mismo capítulo, así como en el capítulo 8, se comenta la tecnología láser en más detalle. Para más detalles sobre el cálculo preciso de estos factores, ver [1].

5. CONCLUSIONES

En la fusión por confinamiento inercial se utiliza un *driver* en forma de láser para transmitir energía a una cápsula que contiene deuterio y tritio en su interior. Si se cumplen unas ciertas condiciones termodinámicas el combustible fusionará, produciendo helio, neutrones y energía.



Este proceso tiene lugar en cuatro etapas en un esquema tradicional: depósito de energía, aceleración de la cápsula, compresión y calentamiento del combustible en un punto central e ignición.

En una hipotética central de fusión inercial se produciría un ritmo constante de igniciones en una cámara de fusión. Los neutrones calentarían la cámara de fusión y esta energía a su vez se transferiría a un refrigerante, siendo éste el fluido motor de un ciclo de producción de potencia similar al de cualquier central de producción eléctrica que opera con una turbina.

Existen dos esquemas principales de iluminación (directa e indirecta) y dos esquemas de ignición (rápida y tradicional).



BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. P. Drake, High-Energy-Density Physics: Fundamentals, Inertial Fusion, and Experimental Astrophysics. Springer Science & Business Media, 2006.
- [2] M. Coteló Ferreiro, “Análisis de ecuaciones de estado para alta densidad de energía.” 2009.
- [3] A. Rivera, “Tecnología Nuclear, ETSII, UPM.” 2015.
- [4] Fusion Energy Sciences Advisory Committee and for the Office of Science of the U. S. Department of Energy, OPPORTUNITIES IN THE FUSION ENERGY SCIENCES PROGRAM. 1999.
- [5] J. Lindl, Inertial Confinement Fusion: The Quest for Ignition and Energy Gain Using Indirect Drive. Peshawar, Pakistan; New York, NY, USA: American Institute of Physics, 1998.
- [6] M. Perlado, “Fuentes de Energía , ETSII, UPM.” .
- [7] R. Kodama et al., “Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition,” Nature, vol. 412, no. 6849, pp. 798–802, Aug. 2001.

BIBLIOGRAFIA DE FIGURAS

- [4.1] Elaboración propia en base a: [2]
- [4.2] Elaboración propia en base a: Based on Science and Technology Review, July/ August 2007 and Science and Technology Review, May 2001 Dominio público, https://en.wikipedia.org/wiki/File:NIF_beamline_diagram.png
- [4.3] Elaboración propia en base a: [1]
- [4.4] Tomada de [1]
- [4.5] Tomada de: <https://lasers.llnl.gov/>
- [4.6] Tomada de: <https://lasers.llnl.gov/>
- [4.7] Elaboración propia
- [4.8] Tomada de: [7]
- [4.9] Elaboración propia
- [4.10] Elaboración propia
- [4.11] Elaboración propia



5 - RETOS DE LA FUSIÓN NUCLEAR

José Manuel Perlado Martín
Autor

Nuria Moral Fernández
Revisora

1. INTRODUCCIÓN

Comencemos por recordar algunas siglas que representan los peones avanzados del conocimiento en esta fuente de energía: ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) para la FCM y NIF/LMJ (*National Ignition Facility/Laser Megajoule*) para la FCI. Siglas que representan los sistemas experimentales donde se deberán lograr las condiciones que demuestren de manera fehaciente la física de la generación neta de energía mediante la fusión nuclear.

En esas instalaciones, que no son reactores de potencia capaces de estar conectados a la red eléctrica suministrando energía, existen todavía muchas dudas e interrogantes, como se pondrá de manifiesto en los capítulos 7 y 8. Más aún queda para aquellas plantas capaces de dar potencia eléctrica útil a la sociedad. ITER supondrá, cuando funcione a pleno rendimiento en el año 2035 según la estimación actual, un sistema con una ganancia energética de $Q = 10$, lo que implica una potencia final no continua de 500 MW_i frente a los 50 MW previstos para el calentamiento del plasma. NIF o LMJ, ya en funcionamiento total o parcial, deberán demostrar, cuando estén operando de manera apropiada, la obtención de ganancia de energía unidad, o algo mayor, entre las reacciones de fusión nuclear y la energía depositada por el láser.

La existencia de estas instalaciones permitirá, además de demostrar que es posible dominar la física de la fusión nuclear en los dos caminos termonucleares posibles, disponer de un banco de pruebas de las bases sobre las que se sustentan las tecnologías de un reactor de potencia.

Ahora bien, este logro fundamental no es suficiente para llegar a la meta de las promesas de energía eléctrica a gran escala por las que la fusión nuclear ha recibido la atención prolongada y multimillonaria de las sociedades. Se necesita también ir dando los pasos necesarios para diseñar y demostrar los sistemas que compondrán el reactor de potencia. Esos retos son los que se van a exponer en este capítulo; algunos habrá que se escapen a este libro por su aparición sorprendente en un futuro próximo.

Para lograr una planta de potencia de FCM, quedan por demostrar (por citar algunos ejemplos):

- Tecnología eficiente y de escala de los superconductores que generarán los campos magnéticos deseados.
- La consecución de largos tiempos de confinamiento que lleven al funcionamiento estacionario de un plasma con suficientes reacciones de fusión.
- Definir cuál de las opciones posibles de control del plasma, como son los tokamak o los stellarator, es la alternativa básica para la escala de planta de potencia.
- La comprensión y eliminación de las disrupciones del plasma y de sus efectos.
- Los materiales capaces de aguantar las cargas térmicas y los efectos atomísticos que se pueden dar en las paredes de la cámara, y de manera muy especial en el divertor.
- El diseño y elección final del manto reproductor de la cámara del plasma donde se produzca la óptima extracción de la energía asociada a las partículas generadas en la fusión, y la reproducción del tritio.



- Regeneración de tritio que alcance no solo a reponer lo gastado, sino a producir al menos un 20% más.
- Diseño y construcción de la planta de tritio donde se pueda manipular el tritio generado en el manto (sea en matriz sólida o en fluido líquido) para obtener la carga sucesiva del combustible de la planta.
- Definición y establecimiento de los niveles de radiactividad en los diversos puntos del sistema, logrando demostrar que su valor es inferior a la normativa establecida por los organismos reguladores.
- Definición de los sucesos potenciales por los que el dispositivo pudiera operar en condiciones no seguras.

Si nos referimos a la FCI, los logros necesarios para obtener la eficiencia energética del sistema a escala comercial pasan por requerir:

- Blancos de alta ganancia con energía generada por fusión del orden de 50 a 1000 veces mayor que aquella proporcionada por el haz de iluminación.
- Sistema de iluminación eficiente con rendimientos en el rango del 10–30 % y tasas de repetición de 5–10 Hz.
- 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) y por supuesto con un bajo grado de activación radiactiva

Es importante destacar que algunos de los objetivos en el área de la tecnología del reactor de potencia, expuestos en la descripción de FCM, son similares para ambas opciones: materiales, tritio, mantos y sistemas de planta. En cada una de las secciones se abordarán temáticamente las dos grandes opciones de la fusión termonuclear.



2. FÍSICA DEL PLASMA

En este apartado se pasa a resumir los principales retos que debe superar la física de plasmas, tanto para FCM como para FCI.

2.1 RETOS DE LA FÍSICA DE PLASMAS EN FCM

En el caso de la FCM los más significativos son:

- Incremento sustancial de la duración de los tiempos de confinamiento del plasma, así como de la duración de los pulsos del mismo. En la actualidad nos movemos en tiempos de confinamiento para ITER de 5 s, con experiencias muy recientes en 2015-16 en la máquina china EAST de 30 s, y tiempos de pulso de 1000 s (ITER) frente a los mucho más largos deseados (ver figura 5.1).
- Obtención de modos avanzados de confinamiento del plasma, mejorando sustancialmente el actualmente previsto para una máquina de potencia como ITER: el *H-mode* (de alto, “*high*”) confinamiento.
- Control de los ELMs (“*Edge Localized Modes*”) mediante perturbaciones magnéticas y control de las cargas térmicas en el divertor.
- Ser capaces de detectar, eliminar y mitigar el efecto de las posibles disrupciones; en este sentido, desarrollar conceptos de inyección de blancos combustibles (entre otros) para lograr la mitigación de las consecuencias y otras soluciones. El manejo eficaz de las disrupciones del plasma es fundamental para una operación fiable y segura.
- Comprender bien el efecto del transporte del combustible, y de las impurezas posiblemente asociadas en la operación del plasma.
- Aunque asociadas a los estudios de tecnología, los estudios de divertor e interacción plasma-pared y mecanismos de diseño del divertor y las cargas reales a él asociadas.



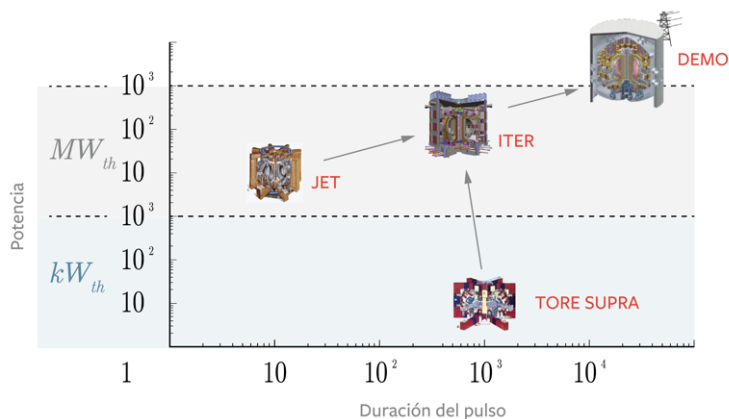


Figura 5.1 Potencia vs. duración del pulso

Como sabemos bien el plasma no se deja fácilmente dominar y el paso al modo de alto confinamiento (*H-mode*) está aún por alcanzar su total comprensión, siendo el objeto de múltiples estudios teóricos y experimentales. Este conocimiento es fundamental para alcanzar el estado estacionario o más largos tiempos de confinamiento.

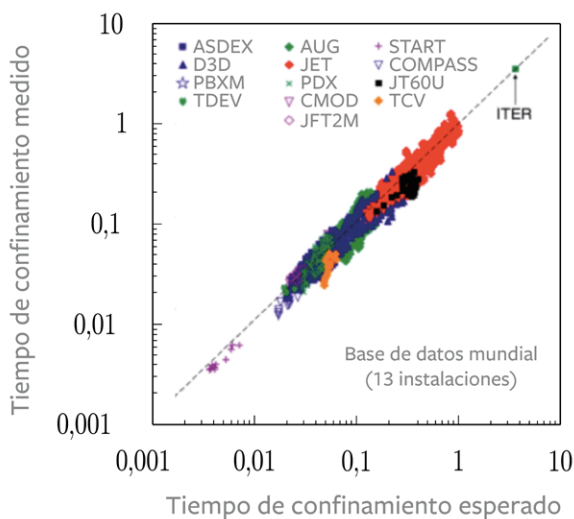


Figura 5.2 Tiempo de confinamiento medido vs. predicho

Habiendo sido ese modo identificado por accidente, sí se sabe que la estabilización de las turbulencias en el plasma, causa de la pérdida de confinamiento del mismo, se debe a un diferencial en la velocidad de rotación poloidal de las superficies magnéticas del plasma; rotación que se debe a los campos eléctricos en el mismo.

Una modificación de esos campos eléctricos supone un cambio en la velocidad mencionada aminorando la turbulencia. Con ese mecanismo va asociada una barrera de confinamiento en el borde del plasma (*ETB*, *Edge Transport Barrier*) que sirve de contención al escape, transporte de partículas y energía hacia el exterior. Lo explicado anteriormente se traduce en grandes gradientes de presión en el borde del plasma, y así se puede ver en la figura 5.3 donde se representa el modo de bajo confinamiento (*Low*, *L-mode*) y el de alto (*H-mode*). Lamentablemente la solución no es completa porque en ese estado se observa el crecimiento de inestabilidades conocidas como ELM (*Edge Localized Modes*, ver capítulo 3 apartado 2.3) consecuencia del relajamiento espontáneo y pulsado de esos gradientes provocando el escape de partículas y calor hacia las paredes de la cámara. Ese proceso de relajación del gradiente de presión retorna de nuevo a su estado original antes de que se dé el desconfinamiento global, pero en cada uno de ellos se produce el escape mencionado, como se comentó en el capítulo 3.

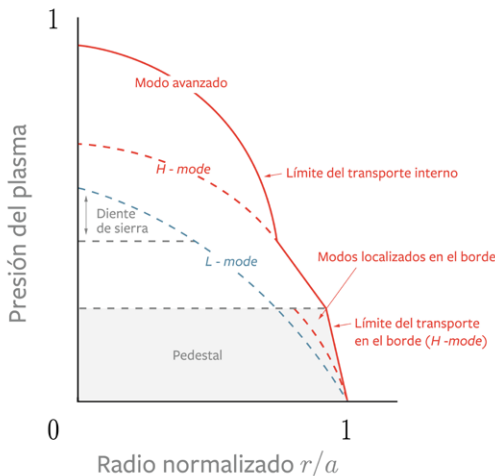


Figura 5.3 Condiciones de confinamiento para distintos modos de operación.



Se precisa más investigación sobre este tema, cuyas conclusiones actualmente se centran en el reconocimiento del papel que juega el tamaño de la máquina, y los métodos de calentamiento y su influencia beneficiosa en la estabilidad del modo. El uso de modos como LHEP (*Low Hybrid Enhanced Performance*) obtenido con el calentamiento mediante frecuencia híbrida, o los obtenidos gracias al calentamiento resonante ión-ciclotrón (ICRH, *Ion Cyclotron Resonant Heating*), FWEH (*Fast Wave Electron Heating*) o el LHCD (*Lower Hybrid Wave Current Drive*) con el que el sistema EAST (China) ha demostrado recientemente un tiempo de confinamiento de 30 s son necesarios. Todos estos procesos son elementos claves en la extensión de los tiempos de confinamiento y la consecución del estado estacionario en el funcionamiento del plasma en un reactor. Situación que está lejos de ser lograda en estos momentos.

Un aspecto clave, cuando se intente operar con alta potencia y un pulso suficientemente largo para alcanzar las características del reactor, es lograr la estabilidad del plasma mientras que se reduce el daño a las paredes de la cámara y del divertor, así como lograr un sistema de escape y extracción de las impurezas de He y de aquellas impurezas generadas en la interacción en las paredes de la cámara con el plasma.

El logro del mecanismo de calentamiento del plasma mediante las partículas alfa generadas en él por reacciones de fusión nuclear, junto a los efectos del almacenamiento de las mismas y su transporte y extracción, son puntos “calientes” en la investigación del plasma y su estabilidad.



2.2 RETOS DE LA FÍSICA DE PLASMAS EN FCI

En el caso de la FCI, en términos generales, nos encontramos con la necesidad de alcanzar, de manera simultánea, magnitudes de varios keV de calentamiento con densidades de varios cientos de gramos por centímetro cúbico. Algo que, obtenido de manera independiente, no ha sido logrado en ninguno de los sistemas actuales. Debemos, en definitiva:

- Demostrar, usando iluminación indirecta en primera aproximación en el NIF o LMJ, la condición de ignición del blanco. La no consecución de los objetivos en las campañas anteriores de NIF (ver capítulo 8, apartado 5.1) parece estar relacionada, entre otros, con dos factores determinantes:
 - i) Las inestabilidades hidrodinámicas generadas por las membranas de soporte del blanco combustible indirecto.
 - ii) Una fuerte asimetría con dependencia temporal en la iluminación mediante rayos X del blanco debido a las inestabilidades láser-plasma en la cápsula contenedora, el *hohlraum*.
- Conseguir que esa condición sea trasladada a aproximaciones más realistas para el caso de un reactor de potencia como la iluminación directa, ignición por choque o rápida, o mediante Z-pinch, consiguiendo además en ellas alcanzar la ganancia necesaria para un reactor.

Son varias las aproximaciones que en FCI intentan demostrar su eficacia como esquemas de iluminación-blanco para una planta de potencia: ignición central tanto en la iluminación directa como indirecta; ignición por choque; ignición rápida; dispositivos basados en Z-pinch bajo potencia pulsada. Todos ellos se encuentran en fase de experimentación siendo los más cercanos a la ignición (actualmente) los relativos a la iluminación indirecta en NIF y próximamente en LMJ. Las otras aproximaciones se acercan lentamente a la resolución de sus problemas para poder ser diseñados a escala de reactor, como el trabajo en OMEGA para la iluminación directa, el realizado en FIREX para la ignición rápida, el de MagLIF en potencia pulsada o el que se realizará en PETAL y en OMEGA sobre la ignición por choque.



siendo superior al efecto del trabajo por compresión en el combustible. En dicha figura se observa como aparecen mejores resultados que los de Hurricane et al. [4], en marzo del año 2014, obteniéndose valores de ganancia del combustible superiores a 2. Los resultados son concluyentes incluso contemplando las barras de error asociadas.

El otro aspecto fundamental, corregido en gran medida y motivo para no alcanzar las condiciones necesarias en las experiencias previas de *Low Foot*, ha sido el control de las inestabilidades hidrodinámicas motivadas en la interacción láser-plasma. Tal y como se ve en las figura 5.4 arriba dcha. y abajo dcha., el crecimiento de dichas inestabilidades es mucho menor en todos sus posibles modos de oscilación en el caso de pre-pulso alto. En esta aproximación de alto pre-pulso aparece, sin embargo, una característica negativa, consistente en la reducción de la convergencia (medida en términos de la relación de los radios final e inicial de la cápsula) y del parámetro crítico del producto de la densidad y el radio en el momento de máxima compresión.

Una pregunta dirigida al proyecto del CEA francés, LMJ similar al NIF, es: ¿podrá LMJ hacer realidad la ignición en este tipo de instalaciones sin los problemas conocidos en el NIF? La respuesta, dada en este momento por los científicos franceses, está basada en el uso de un diferente diseño de las cápsulas *hohlraum*

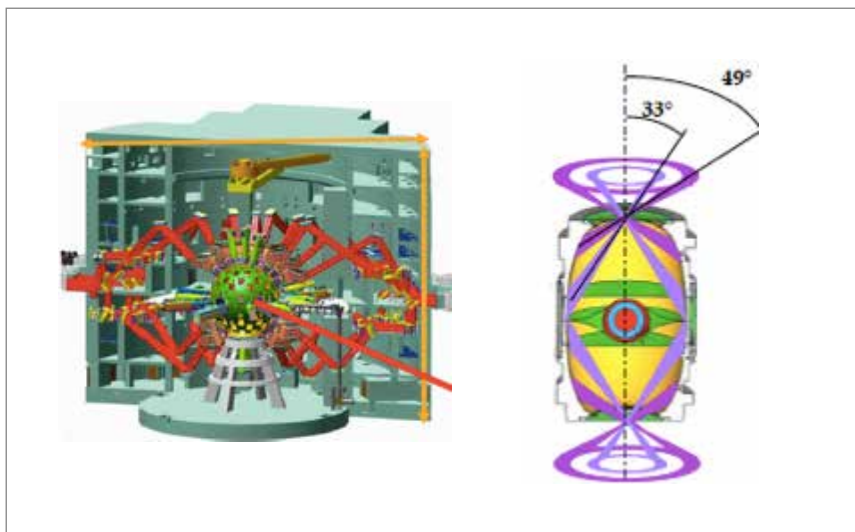


Figura 5.5 Láser LMJ (izda.). Blanco previsto de ignición (dcha.)

de forma similar a las de un balón de *rugby*, figura 5.5.

Para la realización de un reactor de potencia no se contempla la iluminación indirecta, en la que se basan tanto NIF como LMJ, en muchas de las opciones propuestas.

Los esquemas propuestos como mejores candidatos son: iluminación directa, ignición rápida y la de choque. Con una aceptación menor en este momento (algo susceptible de cambiar) se encuentran los procesos de implosión y ganancia energética mediante el uso de los rayos X generados en dispositivos basados en el efecto pinch (Z-pinch).

Los primeros tres esquemas mencionados, aún por demostrar, llevarían a una mayor ganancia de energía para energías de los láseres mucho más reducidas de las que se requieren para la opción de iluminación indirecta.

3. FÍSICA ASOCIADA AL DESARROLLO DE LA TECNOLOGÍA DE LA FUSIÓN

Existen desarrollos conjuntos para la FCM y la FCI relativos a la extracción de energía, el ciclo del tritio, los sistemas de blindaje y protección radiológica, así como algunos de los episodios desencadenantes de situaciones que afectan a la seguridad de la planta. Aunque con diferentes configuraciones, según la aproximación a la fusión, estos elementos del reactor tienen una misma filosofía en sus logros. Deben de ser capaces de garantizar una eficiente transmisión de la energía depositada por los neutrones en el sistema envolvente del plasma y transmitirla al dispositivo de ingeniería donde se produce el salto de entalpía en un refrigerante capaz de conducir el ciclo termodinámico elegido. Deben de garantizar que la magnitud de tritio generado en el reactor sea superior al usado como combustible en el plasma, y deberán de garantizar la seguridad radiológica de los operarios según las condiciones y áreas de trabajo de los mismos.

3.1 PLANTA DE POTENCIA DE FCM



Una planta de potencia de FCM dispone de los sistemas que ya se han descrito en el capítulo 3. Existen muy diversos conceptos, en la figura 5.6 se dan los detalles de las distintas plantas que se están desarrollando teóricamente, tanto de un reactor DEMO (primer reactor de potencia sin todavía el refinamiento adecuado), como comercial. Cada uno de los elementos ahí enunciados supone una línea de investigación.

De los distintos componentes, los mantos reproductores responsables de la extracción de la energía del sistema y de la reproducción de tritio, deberán sufrir una mayor “puesta a punto” desde ITER a la comercialización.

En los programas internacionales de desarrollo y en concreto en el de la Unión Europea, particularmente avanzado en el desarrollo de las mantos reproductores de la planta (PPCS, *Power Plant Conceptual System*), se contemplan diversos conceptos para las mismas: i) Reproductores sólidos cerámicos (p. e. γ -LiAlO₂) en forma de bolas y refrigerados por gas (Helio) (HCCB, *Helium Cooled Ceramic Bed*), y ii) sistemas de refrigeración y reproducción de tritio líquidos (DCLL, *Dual Coolant (He, LiPb) Lithium Lead*, y HCLL, *Helium Coolant Lithium Lead*, WCLL, *Water Coolant Lithium Lead*), ver figura 5.7.

Un aspecto clave en la configuración de estos mantos reproductores de tritio es la duración de los materiales sometidos a la irradiación neutrónica que se estima pueda ser de 75 *dpa*¹ en una primera fase, para pasar a 150 *dpa* en un DEMO y llegar en un sistema comercial muy avanzado a 750 *dpa*.

Por otra parte el material sometido a esa irradiación neutrónica pudiera, dependiendo de su composición química o de la elección de sus elementos constituyentes, convertirse (transmutarse) en radiactivo (fenómeno de activación), de manera que este aspecto resulta ser crítico si se desea cumplir con la premisa/promesa imprescindible de la fusión nuclear de ofrecer una fuente de energía limpia. Hablamos de materiales de baja activación (LAM, *Low Activation Materials*) o de activación reducida (RAM, *Reduced Activation Materials*). El material europeo con el que se comenzará a experimentar es el acero EUROFER (9%Cr-1%W) con un control de impurezas muy estricto en su manufactura. Si la temperatura de funcionamiento se deseara aumentar en 100–150 K (aumento de la eficiencia del ciclo termodinámico estimada en un 37%) la solución que se contempla en la actualidad pasa por una composición similar del acero pero un proceso de fabricación, ODS (*Oxide Dispersion Strength*), que nos conduce a una estructura con nanocristales de

1 Desplazamientos por átomo: el número de veces en que cada átomo de la red es desplazado de su posición original por colisiones atómicas inducidas por la irradiación



Parámetro	ITER	DEMO A	DEMO B	DEMO C	DEMO D	DEMO 1	DEMO 2	ARIES-AT	CFETR	KDEMO	HSR5/22	FFHR2	AREIS-CS
Concepto	T	T	T	T	T	T	T	T	T	T	S	S	S
Potencia (<i>GW_e</i>)	-	1.55	1.33	1.45	1.53	0.5	-	1.00	0.1	0.7	1.62	-	-
Potencia (<i>GW_t</i>)	0.5	5.00	3.6	3.41	2.53	1.8	3.25	1.7	0.2	3	3	3	2.44
<i>Q</i> fusión	10	20	13.5	30	35	36	25	47	2	20	32	30	1.15
Volumen (<i>m³</i>)	837	-	-	-	-	2502	2217	-	-	-	1407	1744	444
<i>R</i> mayor (<i>m</i>)	6.2	9.55	8.6	7.5	6.1	9.0	7.5	5.2	5.7	6.8	22	16	7.75
<i>R</i> menor (<i>m</i>)	2.0	3.18	2.8	2.5	2.03	3.0	-	1.3	1.6	2.1	1.8	2.35	1.7
Temperatura iónica (<i>keV</i>)	8.5	22	20	16	12	27.4	34.7	18	-	20	16	18	6.6
Flujo en primera pared (<i>MW/m²</i>)	0.3	0.6	0.5	0.45	0.5	0.5	0.5	0.45	-	-	0.4	-	0.6
Carga térmica en divertor (<i>MW/m²</i>)	<10	15	10	10	5	20	20	5	10	10	10	2.3	10
Refrigerante del manto	H ₂ O	H ₂ O	He	Li-Pb/He	Li-Pb	He/H ₂ O/ Li-Pb	He/H ₂ O/ Li-Pb	Li-Pb	H ₂ O	H ₂ O	-	-	Li-Pb/He
Refrigerante manto (<i>T_{ent_{iso}}</i>) (<i>°C/°C</i>)	100/150	285/325	300/500	480/700	700/1100	-	-	700/1100	300/500	-	610/	-	500/710
Refrigerante del divertor	H ₂ O	H ₂ O	He	He	Li-Pb	-	-	Li-Pb	H ₂ O	H ₂ O	-	Flibe	He
Refrigerante del divertor manto (<i>T_{ent_{iso}}</i>) (<i>°C/°C</i>)	100/50	140/167	540/720	540/720	600/990	-	-	700/1000	-	290/315	-	-	580/730
Reproductor	-	Li-Pb	Li ₄ SiO ₄	Li-Pb	Li-Pb	-	-	Li-Pb	Li ₄ SiO ₄	Li ₄ SiO ₄	Li-Pb	Flibe	Li-Pb
Ratio de reproducción	-	1.06	1.12	1.15	1.12	1.1	1.1	1.1	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1
Material del divertor	SS	W	W	W	W	-	-	W	-	-	-	-	W
Ciclo	-	Rankine	Rankine	Brayton	Brayton	-	-	Brayton	-	-	Brayton	-	Brayton

Figura 5.6 Características de reactores FCM DEMO y Potencia

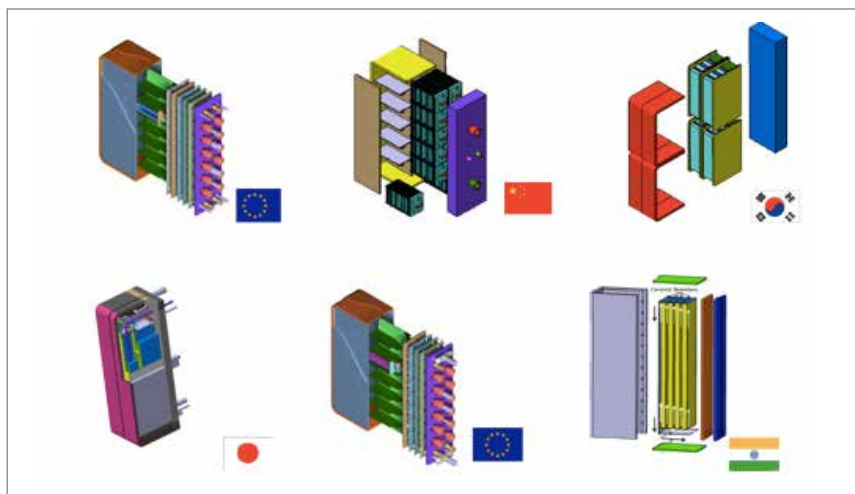


Figura 5.7 Distintos diseños de mantos reproductores propuestos

itrio (Y_2O_3) insertos en el acero. El otro gran candidato como material de baja activación, materiales compuestos basados en el SiC, aumentaría el punto de funcionamiento en otros 150 K y la eficiencia se situaría en 45%. El uso de las aleaciones de vanadio (p. e. $V4Cr4Ti$, $V3TiAlSi$, $V4Ti$, $V4Ti3Al$, $V4TiSi$) tanto como materiales estructurales como refractarios adolece de un problema de compatibilidad con los metales líquidos limitando su uso. Desde el punto de vista de los materiales refractarios, para los que han sido ya descartados el Mo, Nb y Ta, se sigue la línea de las aleaciones basadas en Cr como una primera aproximación ganando en experiencia para llegar a las aleaciones de W últimas. Un aspecto clave es el efecto que los rayos X y las partículas cargadas del plasma puedan tener en los materiales de primera pared de la cámara debido a la interacción plasma-pared. Este fenómeno es particularmente dramático en el caso de FCM y sus potenciales disrupciones del plasma, cuya consecuencia en el divertor del reactor, donde se alcanzarían valores de $10\text{ MW}/m^2$, podría ser destructiva. El impulso recibido por las paredes que ven al plasma se refleja en la figura 5.8.

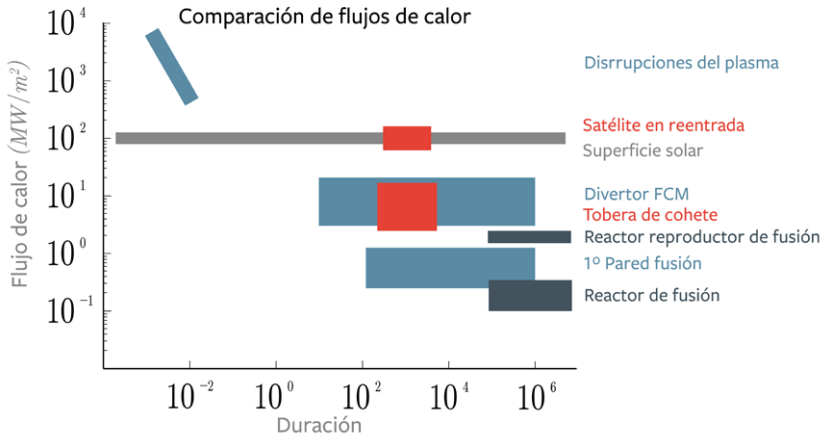


Figura 5.8 Flujos Térmicos que se observan en diversos dispositivos tecnológicos.

Para poder responder de manera adecuada a los efectos atomísticos (*sputtering* y erosión fundamentalmente) y de las tremendas cargas térmicas es preciso diseñar los sistemas de primera pared o divertor con materiales de propiedades adecuadas, o como se verá en el caso de la FCI, diseñar esquemas de protección de dichos componentes. El wolframio o sus aleaciones son los primeros candidatos como componentes de los divertores, bien desnudos o protegidos por sistemas de flujo líquido (Li, Sn, SnLi, etc.) sobre sus superficies, curiosamente como fue propuesto hace mucho tiempo para los reactores de FCI como HIBALL o KOYO.

Un elemento fundamental discutido desde hace muchos años en el ámbito de la fusión, que supone un paso crítico tanto en el programa de investigación tecnológica como en la inversión futura o quizás paralela a ITER, es el desarrollo de una instalación de irradiación de materiales con el flujo neutrónico correspondiente al de los reactores de fusión; es decir, gran dosis de daño y muy alta irradiación total. En la actualidad esta instalación no existe, ni una aproximación a la misma, siendo quizás imprescindible para el desarrollo y validación experimental de los materiales nuevos que aparecen en esta tecnología. De entre diversas opciones iniciales (espalación, Z-pinch, tokamaks esféricos....), la comunidad internacional apuesta en estos momentos por una fuente basada en reacciones nucleares de *stripping*, conocida como IFMIF

(*International Fusion Materials Irradiation Facility*), figura 5.9, usando $^2\text{H}^+$ de 40 MeV (generados por dos aceleradores lineales de 125 mA cada uno) como partícula incidente 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 $5 \times 20\text{ cm}^2$, extrayéndose una potencia de 10 MW con una temperatura de entrada de $250\text{ }^\circ\text{C}$. El sistema dispone, según diseño, de un volumen de irradiación (donde se colocarán muestras) de $0,5\text{ l}$ con una tasa de $20 - 55\text{ dpa/año}$ a plena potencia, otra de 6 l con una tasa de $1 - 20\text{ dpa/año}$, y una muy grande $> 100\text{ l}$ con una tasa de $< 1\text{ dpa/año}$. En todo caso los sistemas de control permitirán mantener la temperatura en el rango correcto entre $250\text{ }^\circ\text{C} - 1000\text{ }^\circ\text{C}$. Compárese con lo previsto en un reactor y mencionado anteriormente.

El diseño y funcionamiento de la planta de tratamiento de tritio es un objetivo esencial en la realización de una planta de potencia de fusión. Veamos un ejemplo como es el del CFER (*Chinese Fusion Engineering Reactor*). Se plantean 3 lazos fundamentales para la recuperación y reciclado del tritio generado en el manto reproductor. Un ciclo más interno en el que se procura la recuperación del tritio y su separación isotópica de los gases residuales del plasma, logrando a posteriori su re-inserción en el sistema. Y un ciclo más externo en el que se lograría el tratamiento de los productos generados en el manto. El tercer ciclo supondrá el tratamiento de los residuos, su confinamiento y la correspondiente detritiación.

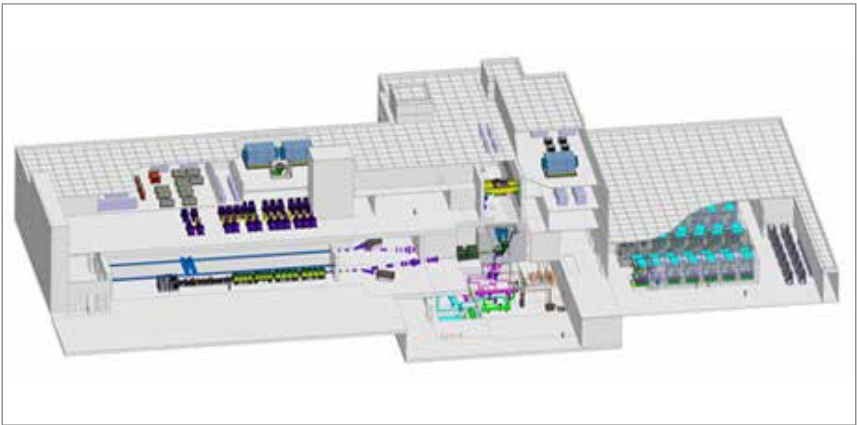


Figura 5.9 Vistas del diseño de la Instalación de Irradiación Neutrónica de Materiales IFMIF

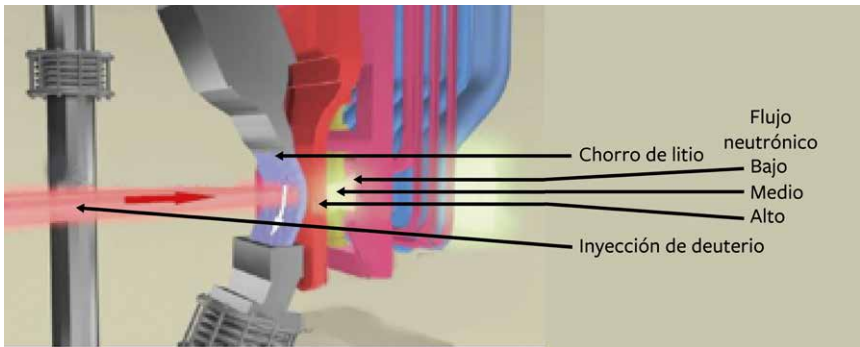


Figura 5.10 Comparación de flujos de calor

Aunque los números actuales de tratamiento, inventario y residuos son muy variables entre los distintos diseños de plantas de potencia que se han desarrollado, sirvan éstos del CFER chino como un ejemplo para un sistema de FCM. En el ciclo interno se tratarían 357 gT/pulso con un volumen de 2 m^3 de $D - T/\text{hora}$ en los primeros sistemas TEP y SDS, y $> 4 \text{ m}^3/\text{hora}$ para el ISS. Se asume una extracción del manto cada 2 semanas para obtener aproximadamente 200 g de tritio. Finalmente, se considera una liberación, con las tecnologías actuales, de 3 g/año de emisión al ambiente que deberían de ser reducidos a $0,6 \text{ g/año}$ de tritio en el futuro con nuevos sistemas de ingeniería.

3.2 PLANTA DE POTENCIA DE FCI

La planta de generación de energía por el método de la FCI se compone, en esencia, de cuatro partes bien diferenciadas (ver figura 5.10):

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

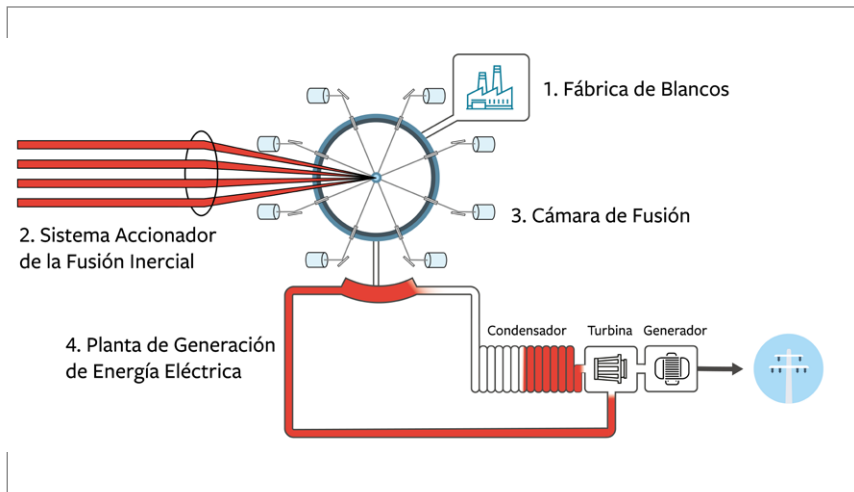


Figura 5.11 Sistemas de una planta de potencia de FCI

La argumentación que justifica la FCI como fuente masiva y posible de energía pasa por conseguir densidades de $600 - 1000 \text{ g/cm}^3$ en un blanco esférico de D - T de mm para lo que se necesita una energía depositada en el blanco de $\approx 5 - 10 \text{ MJ}$, ó menos según concepto. Se obtendrá entonces una ganancia de ≈ 100 lo que representa una energía de $\approx 1000 \text{ MJ}$. Si logramos repetir dicho proceso con una frecuencia de $5 - 15 \text{ Hz}$, se dispondrá de una planta de potencia de $\approx 1000 \text{ MWe}$. La física de la implosión indica que se precisa una duración de pulso del haz de iluminación de $\approx 10 \text{ ns}$ con una potencia en el haz emisor de $\approx 1000 \text{ TW}$ y una intensidad en el blanco de $\approx 10^{14} - 10^{15} \text{ W/cm}^2$. Para que la energía generada sea aún más “rentable” el haz de iluminación (láser o haz de iones) podría operar sobre diversas cámaras de reacción a la vez, simplemente disparando sucesivamente hacia cada una de las cámaras. El esquema de flujo de eficiencias en la planta se representa en la figura 5.12, y nos permite deducir cuales son los puntos fundamentales para una eficiente y rentable consecución de potencia en planta.

El primer elemento es una tecnología láser (candidato hoy frente a los iones pesados) capaz de conseguir la energía, eficiencia y tasa de repetición requerida a lo largo de los 30 o más años de vida de la planta. En este momento hay dos grandes alternativas en los láseres: DPSSL (*Diode Pumped Solid State Lasers*) basado en el Nd y su multiplicación de frecuencia ($1,06 \mu\text{m}$ principal;

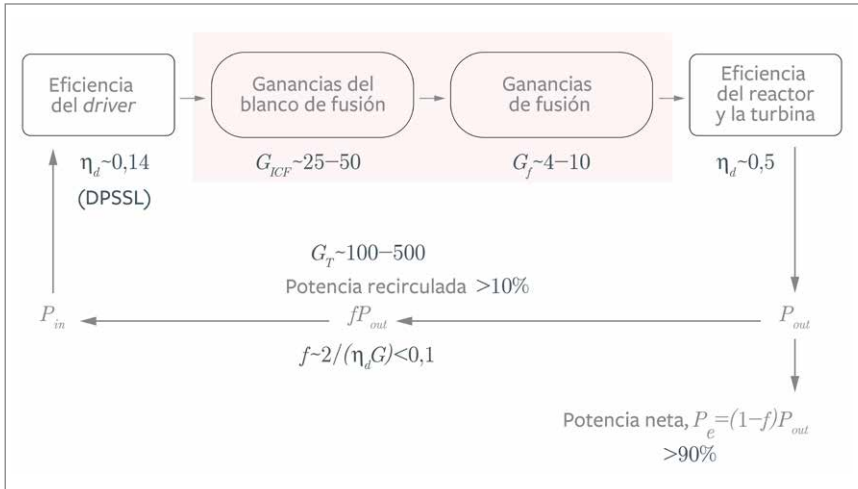


Figura 5.12 Flujo de ganancias energéticas en cada sistema del reactor FCI

$2 w = 0,53 \mu m$; $3 w = 0,35 \mu m$) y el de KrF ($0,25 \mu m$). Las propuestas más cercanas y desarrolladas de reactores (LIFE, LIFT, HiPER) proponen DPSSL, pero laboratorios como el NRL (*Naval Research Laboratory*) en EE. UU. son partidarios del KrF basados en sus propias previsiones.

Además de los problemas asociados a los materiales similares a los de la FCM y otros sistemas comunes como los de recuperación del calor y de parte de los sistemas con los mismos objetivos, las plantas de FCI pueden ser clasificadas dependiendo de la protección de la cámara de reacción, para lograr la mayor vida de los materiales de primera pared (aquellos que enfrentan al plasma) en la planta.

Existe un número muy elevado de prototipos de proyectos de plantas de FCI. En el caso del diseño HYLIFE-II se disponen chorros de un refrigerante como Li-Pb ó Flibe (Fluor - Litio - Berilio) de unos $60 cm$ de espesor que caen a lo largo 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. En dicho dispositivo se asume el uso de haces de iones pesados. Existen otros conceptos, como el denominado SOMBRERO (ver capítulo 8, apartado 3), en el que se utiliza una cámara de pared seca e iluminación directa de blancos por medio de láser

(p.e. KrF). En este concepto la cámara de reacción se compone de un material compuesto basado en fibra de carbono para las estructuras de la cámara, y un manto reproductor que consiste en un lecho fluido de partículas sólidas de Li_2O , siendo la atmósfera de la cámara gas Xe como protección de la primera pared. Otros dispositivos son los mencionados OSIRIS, KOYO y KOYO-F y el, ya pionero como HYLIFE, HIBALL.

Los dispositivos más recientes son el LIFE/EE. UU. basado en un blanco de iluminación indirecta, láser DPSLL y cámara de reacción seca con gas de llenado; el HiPER (ver figura 5.13) europeo basado en ignición por choque o rápida, láser DPSLL y cámara seca no protegida con materiales avanzados basados en capas de nano-W, o el LIFT japonés basado en ignición rápida y pared húmeda con materiales como el SiC poroso.

LIFE ha sido concebido en el LLNL (*Lawrence Livermore National Laboratory*) en EE. UU., e HiPER realizado por un consorcio de laboratorios europeos, siendo el Instituto de Fusión Nuclear de la Universidad Politécnica de Madrid el líder de la parte relativa a lo que aquí nos ocupa: tecnología del sistema.

LIFE es un sistema basado en la iluminación indirecta donde se trata de rescatar al máximo las tecnologías existentes con un reemplazamiento corto del total de la cámara (HT-9) y el uso de materiales a corto plazo con una protección debida al uso de gas Xe o Ar a baja presión.

HiPER por el contrario es un reactor basado en la iluminación directa, preferentemente la ignición por choque aunque se contempla también la rápida, pero con una cámara no protegida que fía su correcto funcionamiento a la aparición de materiales avanzados como los nanomateriales. En este caso particular el sistema está integrado por 16 estructuras independientes y acopladas (como un puzle) para cada hemisferio de la cámara, cada una de las cuales supone un manto que extrae el calor en dos

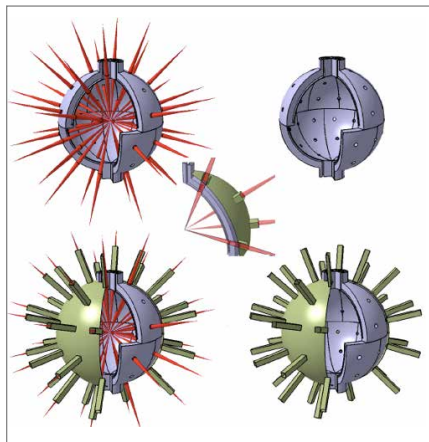


Figura 5.13 Diseño del reactor de potencia europeo HiPER

circuitos correspondientes a la refrigeración de la primera pared (partículas cargadas/He) y el de la mayor parte del manto (neutrones/LiPb) donde se da la reproducción de tritio.

4. CONCLUSIONES

La fusión nuclear, en una u otra de sus opciones tecnológicas, es una opción clara e ineludible en el futuro del abastecimiento energético de una sociedad cada vez más demandante de energía. No parece previsible que esa sociedad que vive en estos momentos bajo un consumo basado en los procesos de transformación de la materia y los recursos naturales, para lo que la energía es imprescindible, rebaje el listón de su demanda. El incremento brutal de su población y las necesidades existentes conminan a las sociedades a la perentoria obligación de considerar el factor energía como algo imprescindible.

No puede ser más cierto en estos momentos, cuando la humanidad se encamina hacia los once mil millones de habitantes al final de siglo, con ya diez mil en el año 2050, y a un desaforado consumo de energía motivado, además, por las migraciones de áreas rurales a urbanas y una duplicación de la demanda de energía prevista en los próximos 40 años, que la necesidad de todas las energías respetuosas con el medioambiente es imprescindible. Las energías renovables ocuparán un lugar fundamental en nuestro futuro esperando un incremento de su uso que pasará de un 25% actualmente a 37% en 2040. Pero otras, insisto ¡otras!, son necesarias, aún más debiendo asumirse un modelo de generación que debe combinar fuentes de baja densidad superficial de energía (el sol, el viento) con las fuentes de muy alta densidad de energía; donde generar gigawatios de potencia suponga extensiones superficiales pequeñas y muy localizadas con una optimizada red de distribución.

El logro de ese deseo no es inmediato aún en la fusión nuclear comercial. El desarrollo de ITER (aún experimental) y de sistemas similares en FCI no tendrá frutos hasta el comienzo de los 2030's. De ese paso a un sistema DEMO y comercial conectado a la red quedará aún una o dos décadas al menos. El escepticismo frente a estas fechas conlleva en algunos ámbitos la pregunta: ¿pero merece la pena? La contestación no puede ser otra que un rotundo sí. Porque queremos resolver el problema que atenaza a nuestras sociedades, que



tenderán a crecer en sus necesidades según las predicciones de finales de este siglo XXI. O ¿acaso creemos que la sociedad (que crece a pasos agigantados) va a dejar de generar más necesidades, o que esas necesidades van a ser las del pastoreo y cultivos extensivos para generar los recursos que necesitarán miles de millones de personas?

BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/fusion>
- [2] <https://www.euro-fusion.org/fusion/>
- [3] J. Edwards et al., presentación en IAEA FEC Kyoto October 2016
- [4] Hurricane et al, Nature 506,343–348 (20 February 2014) [Volver a página 97](#)
- [5] J. M. Perlado, Alfa 26 | IV | pp. 24-33, 2014
- [6] J. L. Miquel, presentación en IAEA FEC Kyoto 2016
- [7] R. Freeman, March 30, 2011
- [8] R. Betti et al., Phys. Rev. Lett. 98, 155001 (2007)
- [9] S. Bodner, et al., High Power Laser Science and Engineering (2013), vol. 1(1), 2–10
- [10] X. Ribeyre et al, PPCF 51, 015013 (2009)
- [11] I. Ricipito et al., presentación en 26th IAEA FEC Kyoto
- [12] J. Knaster et al., presentación en 26th IAEA FEC Kyoto
- [13] Y. X. Wan et al., presentación en IAEA FEC Kyoto 2016
- [14] Presentaciones de M. Dunne, T. Anklam, S. Reyes, E. Moses et al., Lawrence Livermore N. L.
- [15] J. M. Perlado et al., SPIE Proc. 8080-106, 2011
- [16] R. Juárez et al., Fus. Eng. Design 87(4):336–343, 2012.

BIBLIOGRAFIA DE FIGURAS

- [5.1] Elaboración propia
- [5.2] Elaboración propia en base a: <http://www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/fusion/physique/modesconfinement.htm>
- [5.3] Elaboración propia en base a: <http://www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/fusion/physique/modesconfinement.htm>
- [5.4] Elaboración propia en base a: [3] y [4]
- [5.5] Tomada de: [3]
- [5.6] Tomada de: [8]
- [5.7] Tomada de: [11]
- [5.8] Elaboración propia en base a: [14]
- [5.9] Tomada de: <http://www.ifmif.org/>
- [5.10] Elaboración propia
- [5.11] Elaboración propia
- [5.12] Tomada de: <http://www.hiper-laser.org/>



6 - LA FUSIÓN NUCLEAR EN PERSPECTIVA

Kevin Fernández-Cosials
Autor

Alfonso Barbas Espa
Revisor

1. ¿HASTA DÓNDE NOS REMONTAMOS?

Para encontrar los orígenes de la fusión nuclear, la primera pregunta que debe responderse es: ¿Dónde podemos situar el inicio de la serie de acontecimientos que desembocarían en ella? En este sentido se establecerá como inicio, de una forma arbitraria, que para alcanzar la fusión nuclear era preciso avanzar en dos conceptos fundamentales:

El primero es la comprensión de las partículas atómicas y la naturaleza que las gobierna. El segundo, la equivalencia entre masa y energía desarrollada matemáticamente por Albert Einstein. En este capítulo, el lector podrá encontrar la evolución teórica y los primeros experimentos que permitieron la comprensión del átomo y su núcleo, además de la relación existente entre masa y energía. Se continuará con la tecnología que desarrollaron los científicos posteriormente, con el marco teórico y matemático ya establecido. Se detendrá la narración en un punto clave de la historia, no sólo de la fusión sino del ser humano en su conjunto: El proyecto Manhattan, donde se gestó la primera aplicación de la fusión nuclear. Después de esta aplicación militar, la ciencia comenzó a avanzar lentamente hacia el uso civil de esta energía; se comentarán los diseños del primer tokamak o stellarator, así como el uso de láseres para comprimir la materia hasta densidades extremadamente altas.

2. EVOLUCIÓN TEÓRICA Y PRIMEROS EXPERIMENTOS

Las ideas que llevaron a la fusión nuclear se basaron en la posibilidad de “extraer” energía de procesos que involucraban una pérdida de masa. Para ello, se suele citar comúnmente a Einstein como el gran descubridor de la equivalencia masa-energía. Se le suele citar, de hecho, como el único y aislado descubridor de esta verdad científica, pero hacer esto sería un menosprecio a la ciencia y al tortuoso camino que ésta suele seguir. La idea de que masa y energía eran en realidad parte de lo mismo se puede encontrar en diversos escritos que se remontan incluso siglos a la famosa ecuación de Einstein.

En 1717, Sir Isaac Newton escribió: *“Are not gross Bodies and Light convertible into one another, and may not Bodies receive much of their Activity from the Particles of Light which enter their Composition?”* (Qu.30 [1]). En esta pregunta que se lanza, podemos comprobar que la intuición de Newton realmente no tenía límites en cuanto a la física de la naturaleza se refiere.

Otro intento de relacionar masa y energía proviene de Emanuel Swedberg, un científico y filósofo sueco que en 1734 escribía que *“Toda materia está, de forma última, compuesta por puntos de movimiento (energía) puro”* [2]. En esta afirmación, puramente teórica y sin base matemática se postula, sin embargo, la equivalencia entre masa y energía. Posteriormente, ya en el siglo XIX, hubo científicos como Lorentz, Thomson o Heaviside, que empezaron a coquetear en sus modelos con una masa llamada “masa electromagnética”, con una componente transversal y longitudinal, la cual tenía una formulación parecida a la relativista:

$$m_l = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$m_T = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Las transformadas de Lorentz y Henri Poincaré servirían a Einstein de base para finalmente formular su teoría. Cabe destacar que las transformadas de Lorentz están tan íntimamente ligadas a la teoría de Einstein que en un primer momento la teoría de la relatividad especial se llamó teoría de Einstein-Lorentz.



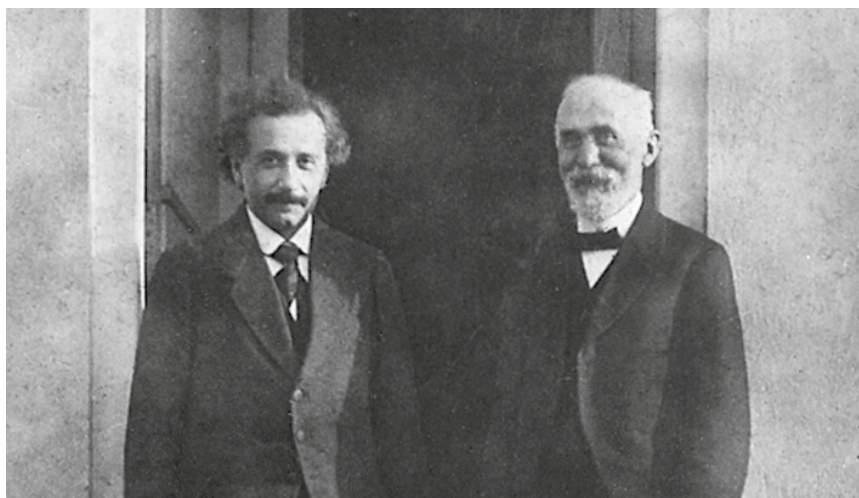


Figura 6.1 Dos buenos amigos, Einstein y Lorentz en Leiden, 1921. De Museum Boerhaave, Leiden

A principios del siglo XX, el concepto de masa-energía empezaba a estar acorralado y acosado por las grandes mentes pensantes de la Tierra. Fue entonces cuando Einstein encajó la mayoría de piezas del puzle. Muchas veces en la ciencia lo importante no es tanto la respuesta, sino el saber cuál es la pregunta importante a responder. Es curioso entonces que la pregunta que se formuló Einstein parece en realidad estar mucho más alejada de nuestro campo:

“¿La inercia de un cuerpo depende de su contenido energético?”

Este era el título del artículo que fue publicado en *Annalen der Physik* en 1905, también conocido como el *Annus Mirabilis* de la ciencia. Con esta aparentemente sencilla pregunta, Einstein relacionaría los conceptos de masa, energía y velocidad de la luz a través de su famosa fórmula (que, cabe mencionar, no aparece como tal en el artículo):

$$E = mc^2$$

A raíz de este descubrimiento la popularidad de Einstein se dispararía como la espuma, y tras describir su teoría de la relatividad especial en 1905, pasó a describir la teoría de la relatividad general en 1915. La intuición básica de Einstein fue postular que en un punto concreto no se puede distinguir



experimentalmente entre un cuerpo acelerado uniformemente y uno cayendo libremente en el seno de un campo gravitatorio uniforme. Esto permitía situaciones que podrían tildarse de “mágicas” de acuerdo con el pensamiento científico de la época. La revolución que supusieron estas dos teorías elevó a Einstein a la condición de leyenda viviente, y más después de las comprobaciones experimentales que se desarrollaron, como la realizada durante el eclipse de sol de 1919 en el que se observó la curvatura de los rayos de luz de las estrellas al pasar cerca del sol.

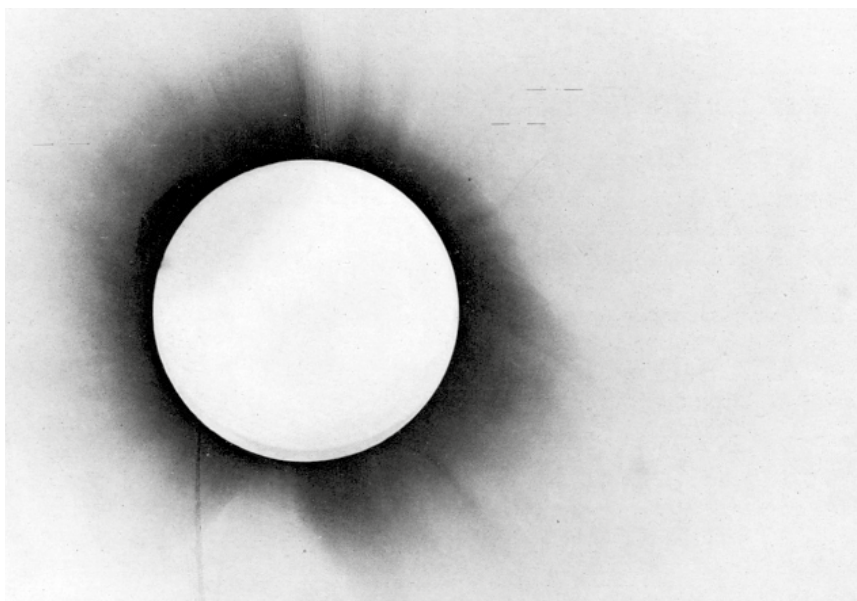


Figura 6.2 Curvatura observada en la trayectoria de la luz por efecto de la gravedad

Así como la equivalencia masa-energía es relevante en el camino de la fusión, la popularidad de Einstein también lo es. El hecho de ser uno de los científicos más reputados de la Tierra le permitiría, como veremos posteriormente, influir sobre el presidente de los Estados Unidos de América, Franklin Delano Roosevelt (1933 - 1945) para que iniciase un programa atómico que más tarde pasó a conocerse como proyecto Manhattan. Para no adelantar acontecimientos y seguir un orden cronológico, se continuará el camino de la mano de dos de los grandes científicos de la época que se preguntaron de qué



están hechos los átomos, Joseph John Thomson, y Ernest Rutherford. Podría decirse que Thomson fue el primero en “dividir el átomo”, al menos de forma teórica. Thomson postuló que esta partícula, en teoría indivisible como su nombre indicaba, parecía estar formada de otras partículas más pequeñas. Para elaborar su teoría, Thomson experimentó con los tubos de rayos catódicos. Estos tubos están formados por un ánodo y dos cátodos. Por el tubo circulan una serie de gases que, al pasar electricidad por ellos, adquieren fluorescencia. La fluorescencia era, en principio, un efecto de los rayos catódicos y Thomson determinó la relación entre la carga y la masa de éstos al medir cuánto se desviaban por efecto de un campo magnético y la cantidad de energía que llevaban. Las conclusiones de Thomson fueron audaces: los rayos catódicos estaban compuestos por partículas a las que llamó “corpúsculos”, y estos corpúsculos procedían de dentro de los átomos de los electrodos, lo que significaba que los átomos son, en realidad, divisibles. Con este descubrimiento, Thomson propuso el primer modelo de átomo divisible, al que se le nombraba como el modelo del “pudín de pasas”, por asemejarse un átomo a un pudín de carga positiva, donde están puestos los electrones de carga negativa aleatoriamente como pasas en ese pudín.

Uno de los alumnos de Thomson fue Ernest Rutherford, el cual demostraba ya de pequeño una capacidad innata para la física. Rutherford fue un hombre que desarrolló una creatividad e inteligencia geniales, y que además del Nobel, entre sus títulos está el de ser el primer auténtico alquimista de la historia, título que se le otorgó por lograr la primera transmutación inducida de materia. Ésta la consiguió al bombardear átomos ligeros con partículas alfa; en este experimento observó que los protones tenían más energía que las partículas alfa que lanzaban. Con esto concluyó que el bombardeo había transformado el nitrógeno-14 en oxígeno-17.

En otro de sus experimentos, Rutherford bombardeaba con partículas alfa una fina lámina de oro. Teóricamente estas partículas deberían sufrir una clara perturbación en su trayectoria si el átomo tuviera la estructura de “pudín de pasas” de Thomson. Sin embargo, Rutherford observó en el experimento que muchas de las partículas atravesaban la lámina, mientras que solo unas pocas llegaban a desviarse. Esto podía significar que la carga positiva estaba muy concentrada en un punto pequeño del espacio dentro del átomo y no que estaba repartida uniformemente sobre el mismo. Con esto, Rutherford imaginó



su modelo atómico, distinto al de su maestro, en el que los electrones negativos orbitaban alrededor de un pequeño núcleo positivo.

Modelos como el de Rutherford permitían definir el núcleo del átomo teóricamente en propiedades y características.

3. FUSIÓN NUCLEAR, DEL PAPEL AL LABORATORIO

A partir de 1920 la fusión nuclear empieza ya a tener muchos más contribuyentes que como pequeñas gotas en el parabrisas de un coche iban impregnando de conocimiento la física del momento hasta no dejar ningún hueco sin tapar. Es por la limitación de espacio que sólo se mencionará a aquellos que se consideren más relevantes, y se pide disculpas de antemano por aquellos científicos que no aparecerán en este libro.

En el año 1920 Arthur Eddington, un astrofísico inglés, basándose en las precisas medidas de los pesos atómicos, fue el primero en sugerir que las estrellas obtienen su energía de la fusión del hidrógeno y el helio. Esta teoría fue muy controvertida ya que aplicaba principios de la equivalencia masa-energía, a un campo en teoría desacoplado de la física nuclear como es la astrofísica. La teoría no acabó de confirmarse hasta 1938, cuando el científico Hans Bethe dio con la teoría correcta de fusión estelar. Esta ingeniosa idea de Eddington no pudo haberla concebido si además de astrónomo no fuese un excelente entendido de la teoría de la relatividad de Einstein. De hecho, fue su expedición la que observó la curvatura de la luz en el eclipse de 1919, por lo que se les consideraba a él y a Einstein las únicas dos personas que entendían la relatividad general.

En 1929 Robert Atkinson, un científico británico, colaboró con otro científico de origen polaco-alemán llamado Fritz Houtermans para aplicar la teoría del efecto túnel cuántico descrita por Gamow al proceso de la fusión nuclear en las estrellas. Fueron los primeros en aplicar esta teoría a la fusión de núcleos ligeros. También pronosticaron que la creación de núcleos pesados se daría en estas estrellas tras sucesivas fusiones. Sus primeros modelos eran similares al posterior ciclo CNO (ver capítulo 2, apartado 5).



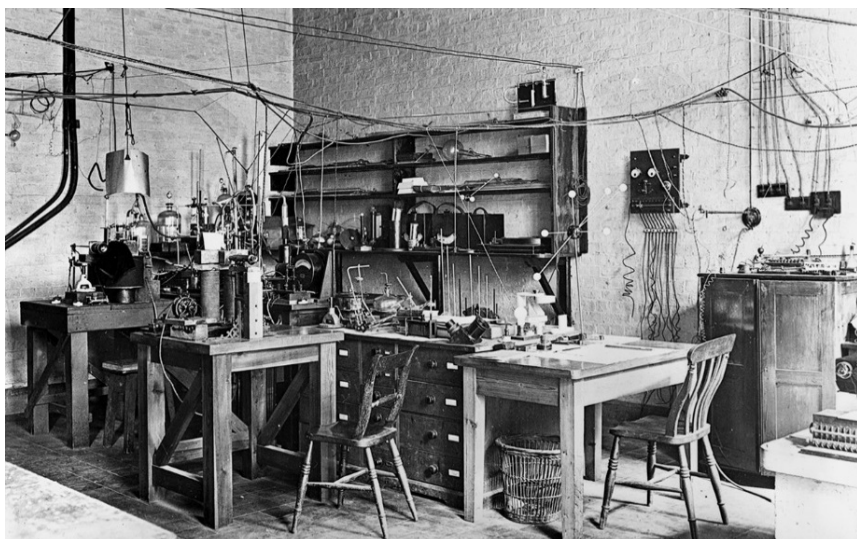


Figura 6.3 Laboratorio de Sir Ernest Rutherford y sus alumnos

La fusión empezó a verse, por tanto, como algo natural que ocurría en las estrellas. Sin embargo la fusión todavía no era un campo de experimentación en la Tierra, solamente se podía teorizar con ella. Fue entonces cuando un estudiante de Rutherford, llamado Marcus Oliphant, realizó un curioso experimento. Era el año 1932 y él y su grupo habían construido un pequeño acelerador de protones en el laboratorio Cavendish de Reino Unido. De este acelerador salieron descubrimientos como el neutrón o el positrón. Motivados por estos descubrimientos construyeron un acelerador de partículas que podía acelerar protones hasta 6 MeV . Se dio la casualidad de que además el físico Gilbert N. Lewis les hizo un regalo: unas gotas de agua pesada, esto es, moléculas de agua en las que los hidrógenos son reemplazados por deuterios. Atendiendo a su naturaleza curiosa de científicos, lo primero que hicieron con esas gotas fue “meterlas” en el acelerador. Al hacer impactar los deuterones con diversos blancos descubrieron el núcleo de ${}^3\text{He}$ y el tritio, que se habían formado a través de fusión nuclear. El ${}^3\text{He}$ es un isótopo muy raro y el tritio ni siquiera existe en la naturaleza, resultando, como se ha visto en capítulos anteriores, una piedra angular de la fusión nuclear. Siguiendo entonces su intuición, Oliphant propuso que cuando estos deuterones reaccionaban con ${}^3\text{He}$, tritio, o con otros deuterones, las partículas que se encontraban después



de la reacción poseían mucha más energía comparada con la que entraban. Siguiendo las teorías de Eddington, Oliphant propuso que se había dado uno de los procesos de fusión estelar de nuestro Sol pero en el laboratorio Cavendish de Reino Unido. Algo, que lejos de parecer increíble, era cierto, inspirador y a su vez, bello.

4. PROYECTO MANHATTAN

Pasaremos ahora a una etapa oscura de la ciencia, un momento que fue crucial no solo para la evolución científica, sino para la humanidad en su conjunto. La mirada con la que la humanidad observaba a sus científicos cambió radicalmente. Se puede atisbar lo que significó el proyecto Manhattan en las palabras de Robert Oppenheimer, uno de los directores científicos del proyecto:

“En un crudo sentido, en el cual ni la vulgaridad ni el humor ni la exageración podrán extinguir, los físicos hemos conocido el pecado; y este es un conocimiento que ellos no van a olvidar” [5].

El proyecto Manhattan ocupa un importante lugar en la historia de la ciencia, y más en concreto en la historia de la fusión nuclear, sin el cual su desarrollo habría sido totalmente distinto.

El proyecto Manhattan comenzó a gestarse a raíz de una carta en la que se instaba al presidente Roosevelt (1933 - 1945) a iniciar el programa atómico en Estados Unidos. Esta carta fue esbozada por Leo Szilárd y firmada por Albert Einstein. Estos científicos de origen judío pasaron por un momento de pánico cuando vislumbraron el poderío de la energía nuclear por un lado, y la investigación de la Alemania nazi por el otro. Creían que si la energía nuclear llegaba a manos del Reich alemán podría cambiar radicalmente el curso de la guerra. Ha de destacarse, de forma exculpatoria, que Einstein y Szilárd desconocían realmente si los alemanes estaban concentrando sus esfuerzos investigadores en la energía nuclear o en realidad sus científicos estaban investigando otros campos. Se realiza esta aclaración porque en retrospectiva, después de que se iniciase la guerra fría y el Armagedón de la humanidad se viese como algo posible e incluso probable, Einstein dijo que *“debería quemarme los dedos con los que escribí aquella carta”* [6].



Albert Einstein
Old Grove Rd.
Haezen Poort
Peenbo, Long Island
August 2nd, 1939

F.D. Roosevelt,
President of the United States,
White House
Washington, D.C.

Sirs

Some recent work by E.Fermi and L. Szilard, which has been communicated to me in manuscript, leads me to expect that the element uranium may be turned into a new and important source of energy in the immediate future. Certain aspects of the situation which has arisen seem to call for watchfulness and, if necessary, quick action on the part of the Administration. I believe therefore that it is my duty to bring to your attention the following facts and recommendations:

In the course of the last four months it has been made probable - through the work of Joliot in France as well as Fermi and Szilard in America - that it may become possible to set up a nuclear chain reaction in a large mass of uranium, by which vast amounts of power and large quantities of new radium-like elements would be generated. Now it appears almost certain that this could be achieved in the immediate future.

This new phenomenon would also lead to the construction of bombs, and it is conceivable - though much less certain - that extremely powerful bombs of a new type may thus be constructed. A single bomb of this type, carried by boat and exploded in a port, might very well destroy the whole port together with some of the surrounding territory. However, such bombs might very well prove to be too heavy for transportation by air.

-3-

The United States has only very poor ores of uranium in moderate quantities. There is some good ore in Canada and the former Czechoslovakia, while the most important source of uranium is Belgian Congo.

In view of this situation you may think it desirable to have some permanent contact maintained between the Administration and the group of physicists working on chain reactions in America. One possible way of achieving this might be for you to entrust with this task a person who has your confidence and who could perhaps serve in an unofficial capacity. His task might comprise the following:

a) to approach Government Departments, keep them informed of the further development, and put forward recommendations for Government action, giving particular attention to the problem of securing a supply of uranium ore for the United States;

b) to speed up the experimental work, which is at present being carried on within the limits of the budgets of University laboratories, by providing funds, if such funds be required, through his contacts with private persons who are willing to make contributions for this cause, and perhaps also by obtaining the co-operation of industrial laboratories which have the necessary equipment.

I understand that Germany has actually stopped the sale of uranium from the Czechoslovakian mines which she has taken over. That she should have taken such early action might perhaps be understood on the ground that the son of the German Under-Secretary of State, von Weizsacker, is attached to the Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin where some of the American work on uranium is now being repeated.

Yours very truly,
A. Einstein
(Albert Einstein)

Figura 6.4 Carta firmada por Einstein al presidente Roosevelt

La carta fue escrita en 1939 y el proyecto se inició en 1942, contando con muchas de las mayores y más geniales mentes del momento. Es curioso destacar que finalmente Einstein no trabajó en el proyecto Manhattan, ya que sus tendencias pacifistas se consideraron un riesgo para la seguridad.

Científicos que sí trabajaron en el proyecto Manhattan fueron algunos tan famosos y brillantes como Enrico Fermi, Richard Feynmann, Hans Bethe, o Robert Oppenheimer. Todos estos científicos compartían un rasgo común; eran civiles, no militares. Solían ser personas pacíficas, modestamente idealistas a las que les gustaba la naturaleza o el arte y que se vieron involucradas, la mayoría por las circunstancias, en este proyecto. Todos estos hombres colaboraban en el desarrollo de una bomba que, gracias a la reacción en cadena del uranio o el plutonio, tuviese el máximo poder devastador.

El director militar del proyecto era un hombre que poco tenía que ver con los científicos a su cargo. Era el general Leslie Grooves, un “hombre de su tiempo”; era abiertamente racista, jactancioso en su decisión de usar la bomba atómica contra la población civil, y que ninguneaba al presidente Truman (1945 - 1953) en sus declaraciones al explicar de quién fue realmente la decisión de tirar las bombas. Al general Grooves no le gustaba depender de científicos civiles “no fiables”, y por eso mantenía un alto grado de control sobre todas las personas que trabajaban en el proyecto Manhattan, llegando incluso a revisar





Figura 6.5 De arriba abajo e izquierda a Derecha. Hans Bethe, Robert Oppenheimer, Edward Teller, Enrico Fermi, Richard Feynman, Julius Klaus Fuchs.

la correspondencia privada. El secretismo, la censura y el total control que imperaban en estas instalaciones, conseguía que los científicos se desligasen de la realidad y que se alejasen del mundo exterior. Un hecho remarcable es que a pesar de todo este estado policial creado en las instalaciones del proyecto se sabe a ciencia cierta de personas de fuertes creencias comunistas que entregaban información al extranjero desde dentro del proyecto, como lo era el científico Julius Klaus Fuchs [6].





Figura 6.6 Cartel a la salida de las instalaciones de Oak Ridge del Proyecto Manhattan.

By James E. Westcott

Tras la primera prueba atómica, llamada Trinity en homenaje a uno de los poetas favoritos de Robert Oppenheimer, parte de la comunidad científica de Los Álamos empezó a asustarse. Se vieron creadores del arma que podría llegar a destruir a la humanidad. Sabiendo que el conocimiento científico nunca sería exclusivo, previeron que los soviéticos pronto tendrían la bomba y que esto podría provocar una carrera armamentística sin precedentes en la historia. Las voces de estos científicos no fueron escuchadas, hasta el punto de que Robert Oppenheimer fue expulsado del proyecto por sus tendencias pacifistas y sustituido por otro científico con tendencias mucho más belicosas, otro de los padres con nombre propio de la fusión nuclear: Edward Teller. Edward Teller era un científico de origen húngaro y nacionalizado estadounidense que trabajó en el proyecto Manhattan. Una de las actuaciones más criticadas de Teller sucedió durante la llamada “Auditoría de Seguridad” promovida por el FBI, donde formuló una grave acusación contra Robert Oppenheimer señalándolo como espía del comunismo. Esta acusación fue apoyada por J. Edgar Hoover, lo que provocó la salida del escenario de Oppenheimer, dejando vía libre a Teller para co-producir la bomba de hidrógeno a la cual Oppenheimer se oponía.



Teller, que fue caricaturizado por Peter Sellers en la película de Stanley Kubrick “Teléfono Rojo, volamos hacia Moscú”, fue junto a Stanislaw Ulam, el principal inventor de la bomba de hidrógeno. En esta bomba se usaba la fisión nuclear del uranio o del plutonio para iniciar una reacción de fusión nuclear de hidrógeno, mucho más energética y destructiva. La prueba nuclear de “bombas H” comenzó en el Pacífico en 1952 con Ivy Mike, liberando ésta más de 10 megatones de energía, la mayor bomba creada hasta entonces en la primera gran reacción de fusión nuclear realizada por la humanidad. La carrera nuclear siguió su curso ante una humanidad expectante y tuvo su punto de máximo terror y demostración de poder destructor en la detonación de la “bomba del Zar” por parte de la URSS (1964).

En esta bomba, en cuyo diseño participarían Igor Kurchátov y Andréi Sájarov, se liberaron 50 megatones en la mayor explosión nuclear hasta hoy. Sin duda la ciencia, que hasta entonces había traído a la humanidad inventos con el propósito de mejorar y enriquecer la vida de las personas, se había transformado en un ente oscuro, que hablaba un lenguaje ininteligible por la mayoría de la gente y era la responsable de haber traído el miedo y la desesperanza al corazón de la humanidad. Este pecado original, con el que la ciencia ha sido marcada, difícilmente será olvidado. Acudimos a Robert Oppenheimer para citar las palabras del poeta hindú Bhagavad-gītā que le vinieron a la mente contemplando el hongo nuclear de Trinity, y refiriéndose a la ciencia: *“Ahora me he convertido en muerte, el destructor de mundos”*[\[6\]](#).

5. TRANSICIÓN AL PROGRAMA *ATOMS FOR PEACE*

Influenciado por las ideas pacifistas de Robert Oppenheimer, el presidente de los Estados Unidos, Dwight D. Eisenhower (1953 - 1961), antiguo general que había luchado en la II Guerra Mundial en Europa, pronunció en 1953 el discurso de “Átomos para la Paz” en la sede de las Naciones Unidas [\[7\]](#). Intentando que Estados Unidos no pasase a la historia de la Segunda Guerra Mundial como un país que cometió atrocidades comparables a las de la Alemania nazi, y temiendo que la guerra nuclear se desatase en Europa, se realizó este ejercicio de reflexión con el que se promovió el uso pacífico de la Energía nuclear, no sólo en Estados Unidos sino en el mundo entero. EE. UU. aportó equipamiento, información y entrenamiento a escuelas, hospitales y centros de investigación por todo el globo



sobre el uso civil de la energía nuclear. Los primeros reactores nucleares de Irán, Israel y Pakistán se construyeron bajo el programa de la American Machine and Foundry.

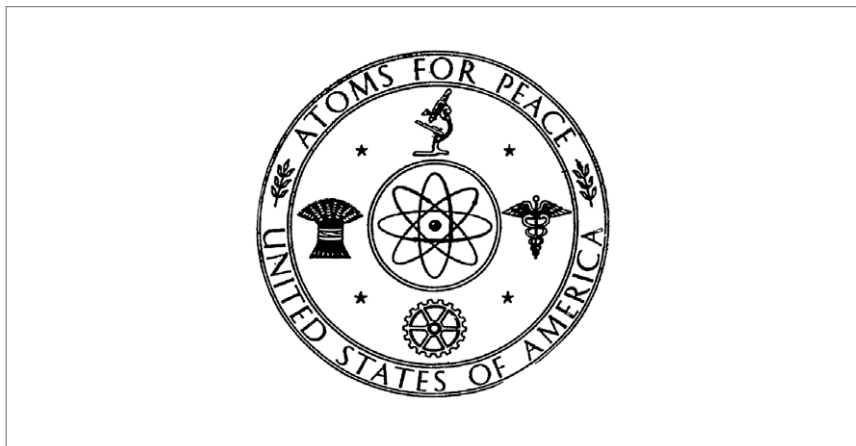


Figura 6.7 Símbolo de *Atoms for peace*

Una consecuencia de esta conferencia y el debate moral que se desarrolló alrededor de la energía nuclear fue el establecimiento del OIEA (Organismo Internacional de la Energía Atómica) en julio de 1957. Esta organización, que se ampara directamente en la ONU (Organización de las Naciones Unidas), busca promover el uso pacífico de la energía nuclear, así como inhibir el uso militar de la misma. En el intento de promover el uso pacífico de la energía nuclear, la OIEA ayuda a los estados miembros (actualmente 167) a compartir información científica, a cooperar en los aspectos técnicos y a transmitir el conocimiento sobre el uso civil de la energía nuclear. En esta nueva etapa, la ciencia parecía empeñada en enmendar sus actos mediante investigación y cooperación en todo el mundo y un exponente en este sentido sería la investigación en tokamaks y stellarators.



6. EL CAMINO YA RECORRIDO POR LA FCM.

La investigación y el entendimiento de los plasmas de fusión siguió caminos paralelos y desconectados entre EE. UU. y la URSS hasta 1958, año del congreso *Atoms for peace* en Ginebra (Suiza).

Por la parte estadounidense nos tenemos que remontar hasta 1951, cuando un hecho bastante estrambótico marcaría los pasos a seguir. Éste fue la declaración que hizo el general Perón en Argentina en Marzo de 1951 anunciando que se había controlado la fusión nuclear. Esto resultó ser totalmente falso además de ser demostrado posteriormente como una estafa planeada, pero sirvió para que un científico estadounidense totalmente desconcertado se lo creyese y empezase a pensar cómo lo habrían logrado. Este joven científico era Lyman Spitzer y el darle vueltas a este tema resultó en la invención de lo que llamó el stellarator. Con este dispositivo era posible teóricamente confinar un plasma de fusión a través de los campos magnéticos creados por unas bobinas especiales, tal como se afirmaba en su estudio [8]. Se construyó entonces en Princeton, universidad de la que era miembro, el primer stellarator de la historia, donde se empezaron a realizar experimentos con plasmas y a obtener resultados de este estado de la materia.

En 1956, al otro lado del telón de acero, estaban los científicos soviéticos Ígor Tamm y Andréi Sájarov, trabajando sobre una idea de otro científico llamado Oleg Lavrentiev. Esta investigación desembocaría en 1965 en la presentación del tokamak por parte de Lev Artsimovich. Tamm y Sájarov, que habían trabajado anteriormente en la creación y estudio de las reacciones de fusión a las órdenes del científico Ígor Kurchatov para su uso en bombas de hidrógeno. Análogos a Edward Teller, estos científicos son padres de la fusión nuclear con una pequeña diferencia: ellos aceptaron parte de la responsabilidad de la creación de la bomba H y parecían querer enmendar su error investigando sobre el uso pacífico de la energía nuclear y mostrando una postura claramente antimilitarista (tanto es así que Andréi Sájarov fue galardonado con el premio Nobel de la Paz en 1975). La idea sobre la que trabajaban estos científicos era la llamada botella magnética toroidal con bobinas magnéticas, con la que según ellos se podría aumentar la temperatura del plasma hasta valores muy elevados manteniéndolo confinado en la cámara gracias a los campos magnéticos.





Figura 6.8 Dos viejos amigos, Andrei Sajarov e Igor Kurchatov

Así como el general Perón mintió sobre el control de la energía de fusión, en enero de 1958 se produjo un fenómeno similar, esta vez más propiciado por la segregación de resultados. En Reino Unido se había iniciado el proyecto Zeta, donde se investigaría sobre plasmas para fusión. En cierto experimento se dijo que se alcanzaron 5 millones de grados Celsius, y aseguraron que la energía termonuclear había sido “domesticada”. Los periódicos se hicieron eco de esta noticia con titulares sensacionalistas y tendenciosos como “*Limitless fuel for millions of years*” y “*A sun of our own!*” del Daily Mail [9]. Ese mismo año, en 1958, Le Monde anunciaba: “*Des experts britanniques confirment que l’énergie thermonucléaire n’a pas été domestiquée*” [10].

Cuando por fin en septiembre de 1958 en la conferencia *Atoms for peace* de Ginebra se pusieron en común los avances de cada uno de los grupos (estadounidense y soviético mayoritariamente) se llevaron alguna sorpresa, así como alguna que otra alegría. Los grupos de investigación observaban cómo muchos de ellos habían seguido los mismos pasos, encontrándose los mismos obstáculos y solventándolos de maneras idénticas en muchos casos. Así mismo, se reconoció que existía una falta de base teórica en plasmas para su entendimiento, que era necesaria si se quería progresar. Había una pequeña desilusión en el ambiente por las dificultades que se veían para confinar el



plasma. Pero no todo en esta conferencia fue desazonador; a cambio se observó un espíritu de comunidad científica, de camaradería entre investigadores sin importar de dónde viniesen. Se acordó que se colaboraría abiertamente en confinamiento magnético hasta que se encontrasen soluciones comerciales, además de mantener una postura contra la política de clasificación.

Esta postura abierta de intercambio de información permitió que se construyeran tokamaks y stellarators por todo el mundo, que ayudan al estudio de los plasmas para fusión nuclear. Respecto a los tokamaks, en Asia se construyó el JT 60, en la URSS los “T”s, en EE. UU. el TFTR y en Europa el JET entre otros. Y respecto a stellarators se construyó el Uragan en Ucrania, el Wendelstein 7-X en Alemania, el TJ-II en España o el NCSX en EE. UU. Una de las instalaciones con más éxito es sin duda el JET (*Joint European Torus*), el mayor tokamak construido en Reino Unido. En este proyecto participaba como entidad la Unión Europea, y tenía como objetivo abrir el camino a la fusión nuclear, del cual tomará el relevo el reactor ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*). Las características de estos proyectos se detallan en el capítulo 7.

7. EL CAMINO YA RECORRIDO POR LA FCI

Para la FCI el camino se desliga del magnético a partir de los años 50 - 60, ya que la forma de iniciar la fusión y de confinar este plasma es totalmente distinta. Uno de los primeros avances de este tipo de fusión la podemos encontrar en el artículo que publicó John Nuckolls en la revista *Nature* titulado “*Laser Compression of Matter to Super-high Densities: Thermonuclear Applications*” [11]. En este artículo de 1972, Nuckolls proponía el uso de láseres para la compresión de la materia hasta tal punto que se llegase a producir una reacción de fusión en la misma. Según él, si se reducía mucho el tamaño y cantidad del combustible hasta unos pocos miligramos, no se necesitaría demasiada energía para llevarlo hasta la ignición. El desarrollo de la fusión por este mecanismo está completamente ligado al desarrollo de los láseres de alta potencia que hacen falta para su funcionamiento.

Uno de los primeros láseres fue el Janus, que empezó a operar en 1973. Posteriormente se construyeron Shiva y Nova, ambos láseres con mayor potencia que el anterior. Hay que indicar que el uso de estas instalaciones no



estaba (ni está) dedicado en su totalidad al uso pacífico de la energía nuclear. Poniendo en contexto estos experimentos, hay que tener en cuenta que en los años 60 y sobre todo 70 la opinión pública de EE. UU. y otros países como Francia estaba en contra de las pruebas nucleares en el Pacífico. Esto provocó que los gobiernos buscasen soluciones para seguir investigando en su arsenal termonuclear y este tipo de instalaciones sirven la mayoría del tiempo a este propósito militar.

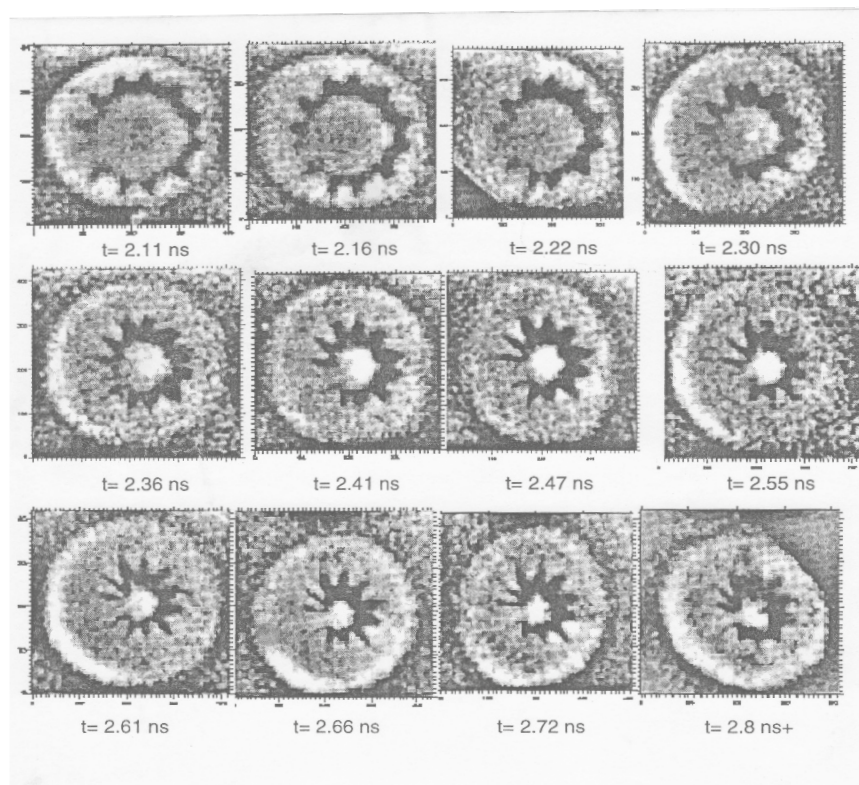


Figura 6.9 Blanco de FCI comprimido por el láser NOVA en 1995.

El proyecto HiPer (*High Power Laser Energy Research*) fue el intento de la Unión Europea de alcanzar la fusión mediante confinamiento inercial. Se propuso el diseño teórico en el año 2000 y actualmente sigue en fase de diseño



con perspectivas no muy halagüeñas. El proyecto por excelencia de este tipo de fusión es el proyecto NIF (*National Ignition Facility*) iniciado en el año 1997 y que actualmente es la instalación más puntera del mundo en fusión por confinamiento inercial (ver capítulo 8).

8. LA LONGITUD DEL CAMINO

A lo largo de este capítulo hemos visto el camino que ha recorrido la fusión hasta nuestros días. Un camino repleto de baches, genialidad y pasión a partes iguales. Si tenemos en cuenta de dónde venimos e intentamos responder a la pregunta: ¿Cuál es el camino que seguirá la fusión durante los próximos años? nos encontraremos con que no es una pregunta fácil de responder, y que quizá no tenga una única respuesta. Por ello, para intentar responderla no nos serviremos de las palabras un científico, como ha sido habitual, sino de las palabras de un poeta: “*Caminante no hay camino, se hace camino al andar*”. [11] Quiso decir Antonio Machado con esta frase que el único camino que es realmente cierto y verdadero es el que está detrás de uno; que el camino a seguir, basado en planificaciones, proyectos o inspiraciones es, como *las estelas de un barco en la mar*, algo difuso e imposible de seguir o predecir con exactitud. Sin embargo, es gracias a perseguir estas mismas estelas que conseguimos avanzar y crear camino detrás de nosotros, y gracias a ello podemos finalmente mirar con admiración al pasado, y con valentía al futuro.



BIBLIOGRAFIA

- [1] I. Newton, "Opticks: Or, a treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light," R. Br. Soc., vol. 1, p. 416, 1704. [Volver a página 111](#)
- [2] E. Swedenborg, De Simplici Mundi vel Puncto naturali. Principia Rerum Naturalia. Leipzig, 1734. [Volver a página 111](#)
- [3] A. Einstein, "Das Prinzip von der Erhaltung der Schwerpunktsbewegung und die Trägheit der Energie," Ann. Phys., vol. 325, no. 8, pp. 627–633, 1906.
- [4] A. Einstein, "Ist die Traegheit eines Koerpers von seinem Energieinhalt abhaengig?," Annalen der Physik (ser. 4), vol. 18. pp. 639–641, 1905.
- [5] K. Bird and M. J. Sherwin, American Prometheus: The Triumph And Tragedy Of J. Robert Oppenheimer. A. A. Knopf, 2005. [Volver a página 117](#)
- [6] O. Stone and P. Kuznick, The Untold History of the United States. Ixtlan Productions, 2012. [Volver a página 117](#) [119](#) [121](#)
- [7] Dwight D. Eisenhower, "Atoms for Peace Speech," 1953. [Volver a página 117](#)
- [8] L. Spitzer, "The Stellarator Concept," Phys. Fluids, vol. 1, no. 4, p. 253, 1958. [Volver a página 123](#)
- [9] R. Herman, Fusion: The Search for Endless Energy. Cambridge University Press, 1990. [Volver a página 124](#)
- [10] Le Monde, 16 Juin, 1958 [Volver a página 124](#)
- [11] J. NUCKOLLS, L. WOOD, A. THIESEN, and G. ZIMMERMAN, "Laser Compression of Matter to Super-High Densities: Thermonuclear (CTR) Applications," Nature, vol. 239, no. 5368, pp. 139–142, Sep. 1972. [Volver a página 125](#) [127](#)
- [12] Antonio Machado, Proverbios y cantares (XXIX), 1909

BIBLIOGRAFIA DE FIGURAS

- [6.1] Tomada de: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=565739>
- [6.2] Tomada de: F. W. Dyson, A. S. Eddington, and C. Davidson, "A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field, from Observations Made at the Total Eclipse of May 29, 1919" Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character (1920): 291-333, on 332., Dominio público, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=182027>
- [6.3] Tomada de: Science Museum London / Science and Society Picture Library - Sir Ernest Rutherford's laboratory, early 20th century. Uploaded by Mrjohncummings, CC BY-SA 2.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=28024311>
- [6.4] Tomada de: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2679498>
- [6.5] Tomada de: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=63676>
- [6.6] Tomada de: <http://www.flickr.com/photos/amse/2965051856/sizes/z/in/photostream/>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=12075242>. By James E. Westcott
- [6.7] Tomada de: United States Atomic Energy Commission - <http://www.eurochemic.be/nl/documents/68-eurochemic-EN.pdf> page 52, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=15995119>



[6.8] Tomada de: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?curid=1387037>

[6.9] Tomada de: LLNL Staff, Department of Energy - <http://quantprinciple.com/qboiler/icf.html>, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=31500756>



7 - ACTUALIDAD DE LA FCM

Raquel Suárez Hontoria
Autora

Nuria Moral Fernández
Revisora

1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo, el lector encontrará una descripción del estado actual de la tecnología y los proyectos que abogan por la FCM. Para contextualizar, se realizará inicialmente un breve repaso de contenidos de los capítulos 3 y 6 aludiendo a la historia y la física de la tecnología de FCM. Posteriormente, se llegará a la descripción de los componentes tecnológicos que conforman esta tecnología, describiendo los últimos avances, problemas y soluciones. Finalmente se describirá el buque insignia de esta rama de la fusión: el proyecto ITER, así como otros proyectos también relevantes que empujan desde todos los lugares del mundo.

2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA FCM

Hoy en día son muchos los países que llevan a cabo investigaciones relacionadas con la fusión nuclear. El proyecto de más relevancia y a su vez el más internacional es el conocido como ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), proyecto liderado por la Unión Europea, EE. UU., Rusia y Japón. No obstante, hay múltiples proyectos de menor envergadura llevados a cabo por China, Brasil, Canadá y Corea.

En la fusión nuclear hay mucho camino recorrido en lo que se refiere a I+D e ingeniería, pero aún hay mucho que avanzar, y para ello la colaboración de todos los países es necesaria.

El objetivo final de todos estos experimentos es construir un dispositivo en el cual, calentando y confinando el combustible (mezcla de deuterio-tritio) el tiempo suficiente, se produzca la reacción de fusión, generando más energía que la aportada.

Inicialmente, las investigaciones y conocimientos estaban en manos de EE. UU. y la antigua URSS, ya que tenían como fin el desarrollo de armas nucleares. Es por ello que todos los avances, resultados, etc. de dichos experimentos y estudios permanecieron en secreto hasta 1958, fecha de la conferencia “Átomos por la Paz”, donde se desclasificó toda la información y se puso al servicio de la investigación con fines no bélicos. Tanto el coste como la complejidad de desarrollar dispositivos de fusión magnética tipo tokamak o stellarators, fomentaron los proyectos de colaboración internacional.

El concepto de tokamak (*TO*roidal/*n*aya *K*Amera s *M*AGnitnymi *K*atushkami o cámara toroidal con bobinas magnéticas) aparece públicamente en el año 1965 de la mano del físico ruso Artsimovich, que presentó el resultado de sus investigaciones en la “2ª Conferencia de Plasma y Fusión Controlada”. Desde entonces, se han construido numerosos tokamaks, el JET (*Joint European Torus*), el MAST (*Mega Ampere Spherical Tokamak*) en Reino Unido y el tokamak TFTR en EE. UU. A finales de los años 90, en los tokamaks JET y JT 60-U utilizando un plasma de deuterio se obtuvieron unas condiciones que hubiesen producido un balance de energía muy próximo al equilibrio si se hubiese utilizado deuterio-tritio como combustible. Esto es equiparable a decir que la energía producida era igual a la energía aportada al sistema, muy cerca al objetivo principal de estos experimentos. En paralelo a este logro, la duración de los pulsos en tokamaks de mayor tamaño llegó a alcanzar dos minutos en el tokamak TORE SUPRA, tiempo que hace viable la operación “continua” en un futuro reactor comercial.

Otro gran logro fue la producción de 17 MW de fusión nuclear a partir de plasma con deuterio y tritio obtenidos en el JET en 1997.

En la figura 7.1 se puede observar cuál era la previsión de desarrollo para la FCM hace unos años. Aunque basada en previsiones desactualizadas, sí se pueden observar cuáles han sido y son los pasos realizados para llegar al objetivo, así como obtener una idea general de la cantidad de proyectos internacionales que hay en marcha para que se lleve a cabo. Existe la confianza de que con los avances tecnológicos actuales sea posible llegar al rango comercial de cientos de MW de forma mantenida.

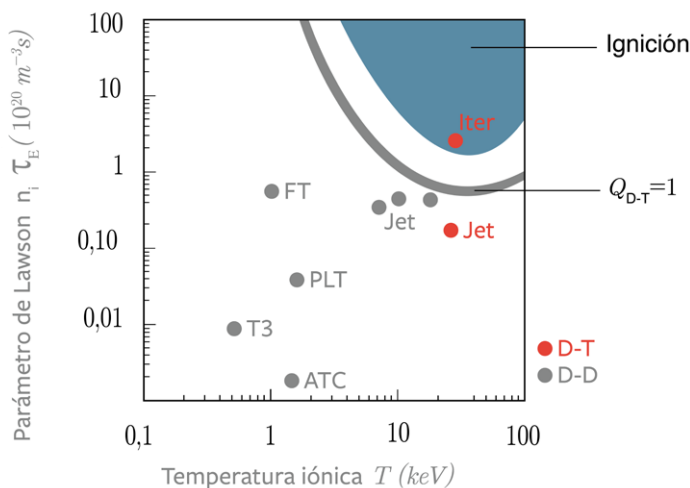


Figura 7.1 Evolución del producto triple en diferentes tokamaks

3. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA FCM

La FCM se lleva estudiando desde hace más de 75 años. No obstante, numerosos han sido, y son, los retos tecnológicos e ingenieriles para llevarla a cabo de forma controlada (recordemos que una bomba H es fusión nuclear incontrolada). El mayor reto está directamente relacionado con la física del plasma: cómo confinarlo, cómo mantener su pureza, cómo recargarlo, o la activación que provocan en otros materiales los neutrones altamente energéticos. En estos 75 años, grandes avances directamente relacionados con el desarrollo tecnológico, electrónico y nuclear, han sido necesarios para llegar al punto en el que se está hoy en día, incluyendo los recursos informáticos con los que se cuenta hoy. Los retos principales, en líneas generales, están relacionados con los siguientes puntos:

- Maximizar la presión y duración del plasma.
- Disminuir la inestabilidad del plasma (fuerza centrífuga alrededor del toroide).

- Controlar las turbulencias (a causa de fluctuaciones magnéticas y eléctricas, las partículas pierden energía) y transporte de energía.
- Desarrollar nuevas configuraciones de toro que minimicen estos problemas con el plasma.
- Diseñar la primera pared del toro, que tiene interacción directa con las altas temperaturas, presiones y neutrones de alta energía, por lo que tiene que estar compuesta por materiales de alta resistencia térmica, alta conductividad y que no se activen fácilmente con neutrones de alta energía.
- La producción de tritio necesaria de modo autosostenido.

4. ACTUALIDAD DE LA TECNOLOGÍA DE LA FCM

Tomando el proyecto ITER como referencia, a continuación se profundiza un poco más en los problemas relevantes:

Producción de tritio

Los estudios europeos sobre el manto reproductor se concentran en dos modelos: el de Li-Pb, y el de bolas cerámicas fértiles, ambos refrigerados por helio. Esta investigación es crucial para el desarrollo del ciclo del tritio en un reactor de fusión.

El confinamiento

Sabemos que, para que la fusión tenga lugar, el plasma tiene que estar confinado el tiempo suficiente para llegar a las condiciones necesarias. (ver capítulo 2, apartado 6) Es por ello primordial mantener la pureza del mismo, ya que si no la reacción dejará de ser autosostenida y terminará. Esto implica mantener el plasma lejos de las paredes de la cámara, ocupando un volumen bien delimitado en el espacio. De acuerdo a los planes de diseño actuales, se necesitarán 80 000 *km* de cables superconductores (Nb_3Sn) para cablear las 18 bobinas toroidales, el solenoide central encargado de inducir la corriente en el plasma y otra serie de bobinas auxiliares para el “control fino” del campo

magnético. Con un total de 48 electroimanes, la generación del campo magnético de $11,8\text{ T}$ (200 000 veces el campo de la Tierra) ocupa la mayor parte de la máquina, sumando 6540 toneladas.

Las paredes de la cámara y divertor

Una vez conseguida la reacción de fusión, se generarán ingentes cantidades de calor y energía, de la que el 80% escapará en forma de neutrones rápidos ($14,1\text{ MeV}$). Como los neutrones no tienen carga, no se pueden reconducir con ningún campo magnético hacia un lugar concreto. Este ha sido uno de los mayores retos ingenieriles desde el principio, ya que toda la primera pared de la cámara estará expuesta a un intenso bombardeo de neutrones altamente energéticos; por tanto, los componentes que dan la cara al plasma deben cumplir dos criterios de diseño:

- Ser lo suficientemente resistentes para aguantar tiempo suficiente (meses o años) a la radiación y temperatura. La elección del material de estas superficies ha sido uno de los problemas más rigurosos del diseño del reactor y queda mucho trabajo experimental por delante hasta llegar a una solución válida en un reactor comercial. El material escogido debería tener buena conductividad térmica para evacuar fácilmente el calor (estará expuesto a unos $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$), pero a la vez no puede activarse fácilmente, ya que se espera que las piezas aguanten 20 años dentro de un reactor. Se consideran dos opciones: el carbono reforzado con fibra de carbono (CFC) y el tungsteno (o wolframio).
- Ser capaces de evacuar eficazmente el calor que, recuperado mediante un circuito de agua fría, será el que permita generar energía eléctrica en una planta nuclear de fusión real. Para hacerse una idea, la superficie del sol emite $70\text{ MW}/\text{m}^2$, mientras que los últimos tokamaks producen sólo siete veces menos ($10\text{ MW}/\text{m}^2$).

Temperatura

Se precisan más de 100 millones de grados para que arranque la fusión nuclear en el plasma del reactor. Gracias a los millones de amperios que se esperan inducir en el plasma, la temperatura se llevará, por efecto Joule, hasta unos 10 millones de grados. Para aportar la energía que falta hasta los cientos de

millones de grados, se espera conseguirlo por dos medios: la inyección de neutros acelerados y el calentamiento por radiofrecuencia y microondas (ver capítulo 3, apartado 2.2).

Conseguir ultra alto vacío (entre 10^{-5} y 10^{-7} Pa)

Desde el punto de vista ingenieril, trabajar en condiciones de UHV (Ultra Alto Vacío, por sus siglas en inglés) implica olvidarse de todas las prácticas y los materiales comunes: plásticos, pegamentos, soldadura estándar, etc. Todos ellos tienden a expulsar pequeñas partículas de gas al exponerse al UHV. Las uniones son particularmente complicadas debido a las condiciones de tensión mecánica que deben afrontar: la interacción de las bobinas con el campo generado por la corriente eléctrica en el plasma y por otros imanes producirá grandes fuerzas pulsadas, lo que evidentemente implica que la fatiga podría degradar su estructura con el tiempo. Para resistir mejor estas fuerzas, se colocarán anillos de fibra de vidrio alrededor de cada electroimán, pretensados con una tensión equivalente a 6 000 toneladas.

5. PROYECTOS EN MARCHA Y PREVISIONES

En el presente apartado se pasa a presentar los proyectos más importantes que existen en la actualidad en FCM, haciendo mayor hincapié en los que, por el momento, marcan el camino crítico a seguir: ITER, DEMO y PROTO.

5.1 ITER

A día de hoy ya se han alcanzado las temperaturas y densidades necesarias para producir la fusión autosostenida en los tokamaks existentes, pero el tamaño de dichas instalaciones limita la ganancia neta de energía. Con un diseño de mayor envergadura existiría la posibilidad de ganancia de energía, y ese es el objetivo principal de ITER, el cual tendrá dos veces el tamaño de JET (el tokamak de mayor tamaño hasta el momento).

ITER se basa en el concepto de tokamak. Se está construyendo en el sur de Francia (Cadarache) desde el 2010 y se espera que obtenga su primer plasma

en 2035. Es un proyecto internacional en el que participan 35 naciones, la Unión Europea, Rusia, Japón, EE. UU., India, Corea del Sur y Suiza.

Costes

Los costes iniciales estimados para su construcción eran de 5 millardos de euros. Esta estimación, basada en la mejor información disponible en aquel momento (diseño de 2001), no incluía algunos costes laborales, incrementos anuales y las contingencias. Además, no estimaba adecuadamente el tiempo necesario para las fases de montaje, almacenaje y puesta en marcha de un tokamak único como el de ITER. A fecha de 2017, el presupuesto se ha duplicado hasta alcanzar los 13 millardos de euros.

En 2008, una revisión detallada del diseño sugirió modificaciones al proyecto ITER basadas en los avances en la ciencia de fusión. El hecho de que el número de miembros de ITER pasara de cuatro a siete también contribuyó al aumento de los costes por crear un número mucho mayor de interfases (y, por consiguiente, complejidad) en el diseño. El tercer elemento más importante en el incremento de los costes es el coste de construcción, que ha aumentado significativamente desde la estimación realizada en 2001.

La planificación actualizada (2017) y el nuevo presupuesto estimado, reflejan un avanzado estado de madurez del diseño y una comprensión mucho más profunda del alcance, secuencia, riesgos y costes del proyecto ITER. Basado en la evaluación europea, el coste de construcción de ITER para los siete miembros ha sido evaluado en aproximadamente 13 000 millones de euros (asumiendo que todo fuera fabricado en Europa). Como los costes de fabricación varían según los miembros, es imposible tener una estimación más precisa.

Para las otras fases del proyecto ITER, los costes estimados no han cambiado. El coste de operación anual de la instalación durante su vida útil (aproximadamente 20 años) está estimado en 188kIUA¹ por año. Para las fases de desactivación (2037 - 2042) y desmantelamiento, los costes están establecidos en 281 millones de euros y 530 millones de euros respectivamente (estimación de 2001).

El proyecto

El propósito de ITER es demostrar que se puede obtener ganancia mediante la fusión nuclear por confinamiento magnético. Es un reactor experimental, es decir, no está destinado a producir energía de modo continuo para su

1 IUA, *ITER Unit of Account* o Unidad de Cuenta (1 IUA equivalía en el año 2010 a 1552,24€). Es una unidad monetaria de existencia no física, que se utiliza en las transacciones comerciales y la contabilidad, y mide el valor de mercado

distribución a la red eléctrica.

El objetivo es producir unos 500 MW , habiendo usado 50 MW ($Q = 10$) para la ignición, durante al menos unos 500 s a partir de un gramo de combustible de tritio.

5.2 DEMO

El proyecto DEMO (*DEMONstration Power Plant*), tiene como objetivo la producción en modo continuo de energía. Se espera que se produzcan $1,5\text{ GW}$ de energía eléctrica de forma continua. Su construcción se debería iniciar alrededor de 2030, estar en operación sobre 2040 y debería cumplir sus objetivos antes de 2050, aunque son esperables retrasos en el cronograma. En cambio ITER, busca la demostración de la producción de plasma autosostenido, no tendrá un ciclo de combustible “autosuficiente”. La figura 7.2 muestra un cronograma de ITER y DEMO.

El diseño de DEMO no ha sido formalmente seleccionado y los requisitos de

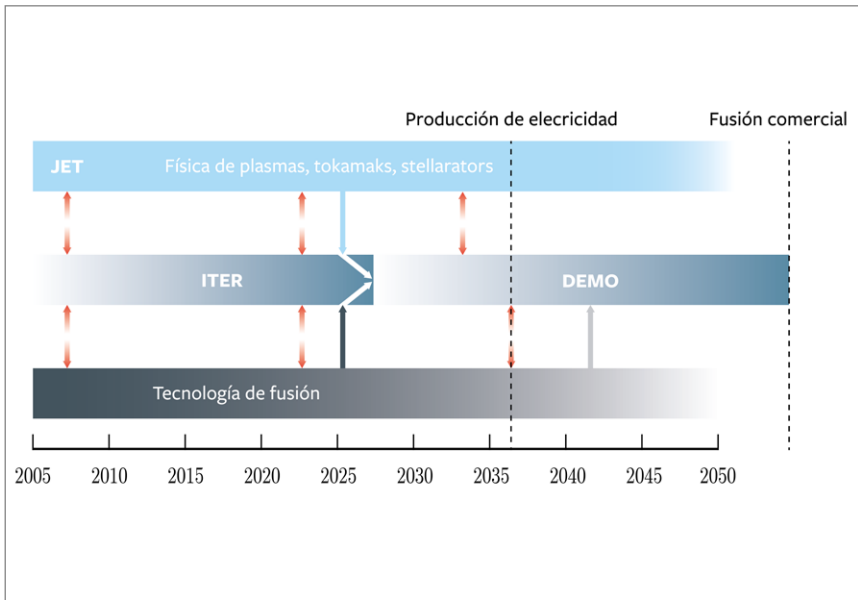


Figura 7.2 Cronograma de ITER y DEMO

operación aún no están disponibles. Los códigos y modelos a utilizar tienen que ser aún desarrollados. El diseño se basará en gran medida en la física y tecnología validada previamente en ITER.

Los objetivos de DEMO son los siguientes:

- Producir energía con conexión a la red eléctrica.
- Obtener la cantidad de tritio necesaria para cerrar el ciclo del combustible.
- Demostrar que toda la tecnología para la construcción de una futura planta comercial es viable.

5.3 PROTO

El primer prototipo de reactor de fusión comercial se llamará PROTO (*PROTOTYPE Power Plant*) y aún no ha sido diseñado en detalle. Una planificación de trabajo se muestra en la figura 7.3.

Guenter Janeschitz, físico austríaco coordinador del ITER *Design Review*,

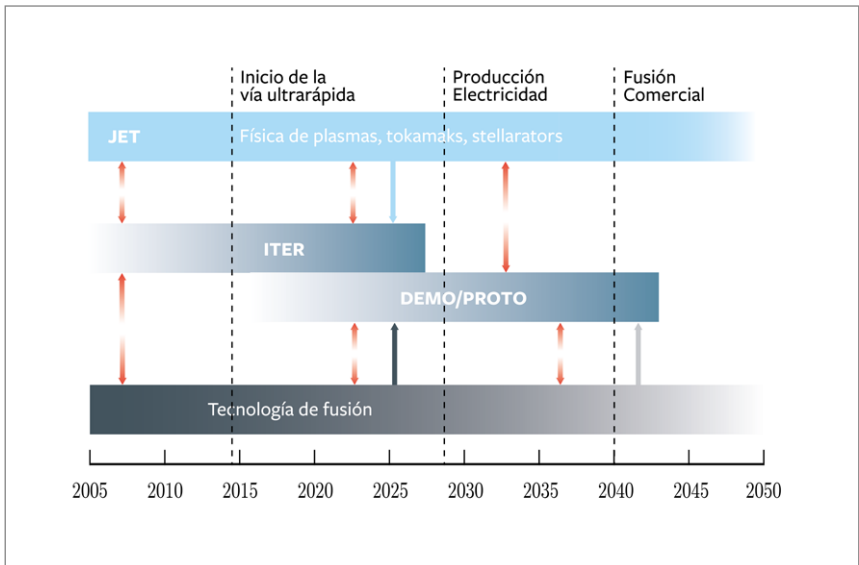


Figura 7.3 Cronograma de ITER, DEMO y PROTO

propuso una “vía ultrarrápida” para la fusión comercial que podría lograr un prototipo final durante la década del 2030. Esta propuesta se basaba en simultanear la construcción de un proyecto combinado DEMO/PROTO con la de ITER, empezando en 2016.

Se introducirían ciertas mejoras en el diseño de ITER y se diseñaría DEMO de tal forma que permitiese su transformación en PROTO sin necesidad de un proyecto separado.

5.4 OTROS PROYECTOS

Hay numerosos proyectos en paralelo a ITER que están desarrollando mejoras en la tecnología, soluciones a los problemas, etc. En este apartado se van a enumerar los más importantes, pero no los únicos, ya que hay más de 30 tokamaks convencionales en marcha alrededor del mundo.

JET (*Joint European Torus*)

Situado en Reino Unido, es el resultado de un consorcio de más de 40 laboratorios europeos. Es el mayor tokamak en operación hasta la fecha, y se prevé que seguirá operativo hasta finales de 2019. Solo JET es capaz de usar combustible mixto D - T. JET ha sido diseñado expresamente para estudiar el comportamiento del plasma en condiciones próximas a las necesarias en un reactor de fusión. Produjo su primer plasma en 1983, y su mayor hito fue en 1997 cuando consiguió la fusión nuclear controlada (17 MW en un segundo).

JET es una pieza fundamental en el proyecto ITER, se ha ido renovando y actualizando con el fin de probar la física de plasma y sistemas en los que se basa ITER.

JT - 60 y JT - 60SA

Situado en Japón, estuvo en funcionamiento desde 1985 hasta 2010. El objetivo de esta instalación era conseguir aumentar los tiempos de confinamiento a altas presiones y alto nivel de confinamiento (condiciones de fusión nuclear). En 2006 durante 28 s se obtuvo un plasma similar al que se requerirá en ITER. El JT - 60 ha dado lugar al JT - 60SA, proyecto satélite de ITER. La misión del JT - 60SA es contribuir a los diseños de ITER y DEMO desarrollando e inves-

tigando áreas claves en la física necesaria para estos proyectos. Es un tokamak súper conductor capaz de confinar a alta temperatura (100 millones de grados) plasmas de deuterio. Está diseñado para optimizar el plasma que se utilizara en ITER y DEMO, así como la posibilidad de experimentar con múltiples variables relacionadas con el plasma como el calentamiento del mismo, la corriente, etc. Se prevé que la construcción esté terminada en 2018 y consigan el primer plasma en 2019.

ASDEX upgrade (*Axially Symetric Divertor Experiment*)

Este proyecto entró en operación en 1991 en Alemania, con el objetivo principal de preparar las bases físicas para ITER y DEMO. Para este propósito es esencial conocer las propiedades del plasma, la densidad, presión y carga sobre la primera pared del tokamak/divertor. En este dispositivo se alcanzan los 100 millones de grados. Como material para la primera pared se ha elegido el estudio del tungsteno, que tiende a ionizarse a altas temperaturas, pudiendo contaminar el combustible. Se han propuesto otros materiales como los compuestos de fibra de carbono o berilio.

K-STAR: (*Korean Superconducting Tokamak Reactor*)

Produjo su primer plasma en 2008. Es una planta piloto para ITER pese a no usar DT como combustible. Proyecto de gran colaboración internacional, va a ser un proyecto satélite de ITER en las primeras fases de funcionamiento del mismo.

- Primera fase de desarrollo en 2012: Prueba del diseño, la tecnología base y obtención de pulsos de plasma hasta de 20 s.
- Segunda fase, actualmente en desarrollo (2013 - 2017), con el objetivo de conseguir pulsos de hasta 300 s en modo H.
- Tercera fase (2018 - 2023), en la que se llevará a cabo el desarrollo de operaciones con pulsos de larga duración, mejorando la eficiencia de la tecnología que sea necesaria.
- Cuarta fase (2023 - 2025), servirá para probar todo lo relacionado con DEMO (materiales, tecnología, etc.).

EAST (*Experimental Advanced Superconducting Tokamak*) en China.

Este tokamak ha sido capaz de producir un plasma de 50 millones de grados y mantenerlo 102 s según el Instituto de Físicas en Hefei.

No hay que olvidarse de los stellarators; basados en este diseño tenemos los siguientes proyectos:

Helical Device

Lleva funcionando en el instituto nacional de fusión japonés desde 1998. Era el mayor stellarator hasta el 2015. Su objetivo es el estudio de los problemas de confinamiento del plasma.

W7 - X

Situado en el instituto Max Planck desde 2015. Anteriormente, desde 1988 disponían del Wendelstein 7 - AS, el cual estuvo en funcionamiento hasta el 2002, cuando se paró para mejorarlo convirtiéndolo en el W7 - X. Desde 2015 ha llevado a cabo numerosos experimentos, en los cuales por un periodo muy breve de tiempo han alcanzado 1 millón de grados utilizando He. En 2016, con hidrógeno y 2 *MW* alcanzaron 80 millones de grados por un cuarto de segundo. Es el mayor stellarator del momento y se planea que opere de modo continuado durante 30 minutos. Su coste es alrededor de 1 millardo de euros.

Heliac-1 stellarator

Construido en Australia, es capaz de producir un rango de plasmas de diferentes configuraciones, lo que permite la investigación de nuevos diseños, ideas, para mejorar el diseño de los dispositivos actuales en marcha, al que seguirá ITER.

6. CONCLUSIONES

Para demostrar la viabilidad de la FCM es necesario todavía un gran desarrollo de la tecnología e ingeniería relacionada (materiales, proyectos, códigos, etc.). Actualmente existen numerosos proyectos en marcha con éste propósito, siendo ITER el de mayor envergadura a nivel internacional.

El proyecto DEMO, entendido como la continuación de ITER, tiene como objetivo la producción en modo continuo de energía. Su construcción se debería iniciar alrededor de 2030, estar en operación sobre 2040 y debería cumplir sus objetivos antes de 2050.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://west.cea.fr/en/index.php>
- [2] <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-fusion-power.aspx>
- [3] http://fire.pppl.gov/aaas05_prager_mfe.pdf
- [4] <https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull20-6/20604780912.pdf>
- [5] <http://www.ipp.mpg.de/>
- [6] <http://www.jt60sa.org/b/index.htm>
- [7] <http://www.jaea.go.jp/english/news/p06052303/index.shtml>
- [8] Guenter Janeschitz, “Fusion Technology Part 2,” CERN, 15 April 2011

BIBLIOGRAFIA DE FIGURAS

- [7.1] Ver capítulo 3
- [7.2] Elaboración propia
- [7.3] Elaboración propia

8 - ACTUALIDAD DE LA FCI

Manuel Cotelo Ferreiro
Autor

Alejandro Carrasco Sánchez
Revisor

NIF

1. INTRODUCCIÓN

De capítulos anteriores se conoce cuál es el proceso físico que permite confinar, comprimir y calentar el combustible de fusión hasta las condiciones de ignición (ver capítulo 2, apartado 6). En este capítulo se desarrollarán conceptos avanzados de la FCI haciendo hincapié en los últimos avances que han aparecido. Se destacarán los componentes más importantes de una instalación de FCI y el actual desarrollo de estos dispositivos.

En primer lugar se hará un resumen de los antecedentes históricos de la FCI antes de introducirnos en el apartado 3 sobre conceptos fundamentales de FCI para poder obtener energía de fusión inercial. A continuación, en el apartado 4 se resume el estado del arte de varios componentes clave para la energía de fusión inercial. Se seguirá con la descripción, en el apartado 5, de NIF (*National Ignition Facility*), la instalación de referencia para la FCI, para terminar, finalmente, con las conclusiones.

2. ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA FCI

La FCI es un campo de investigación que ya tiene un cierto recorrido desde los años 1950. La publicación por Nuckolls en 1972[1] de la idea original de compresión de blancos mediante radiación láser y la consecuente desclasificación de investigaciones previas en el campo, dio lugar a un rápido avance. A medida que avanzaba la investigación, fue desvelándose la complejidad inherente al estudio de blancos de fusión y su diseño para la obtención de ignición. Los primeros experimentos en los años 60 se basaban en producir una compresión del blanco suficiente para producir fusión, y se realizó un gran esfuerzo para demostrar que los neutrones detectados provenían de reacciones de fusión en el combustible. El novedoso concepto de compresión ablativa presentado por Nuckolls en 1972 hizo que la investigación se centrara en este método y permitió diseñar experimentos que lograron demostrar que los neutrones detectados en implosiones de microcápsulas eran de origen termonuclear.

Posteriormente se centraron en resolver y caracterizar los procesos físicos que alejaban a los experimentos de alcanzar la ignición:

- La interacción de un láser de alta intensidad con un plasma producía gran cantidad de electrones supratérmicos que precalentaban el combustible y limitaban su compresión.
- Los procesos físicos mediante los cuales la energía láser se depositaba en el plasma no eran perfectamente conocidos, y dio lugar al desarrollo de modelos y experimentos que lograron aclarar la importancia de la absorción resonante y el *bremstrahlung* inverso en los procesos de absorción.
- Hubo un esfuerzo muy apreciable en el desarrollo de nuevas técnicas de diagnóstico de plasmas para poder caracterizar y medir el comportamiento de los diferentes diseños de blancos de fusión mediante iluminación directa.
- Se demostró la necesidad de utilizar radiación láser de longitud de onda más corta (uso del tercer armónico del láser de estado sólido) para

incrementar la absorción de energía en el blanco. La radiación de longitud de onda corta es capaz de penetrar en el plasma hasta densidades mucho más elevadas, incrementando la eficiencia de los procesos de deposición de energía láser en el plasma. Otra ventaja es que con longitudes de onda más cortas, la zona de absorción de energía láser está más próxima a la superficie de ablación, mejorando la eficiencia. Además la radiación de longitud de onda más corta produce una menor cantidad de electrones supratérmicos, limitando de esta manera el precalentamiento del blanco.

- Se caracterizó la influencia de la uniformidad de la iluminación láser en la calidad de la compresión del blanco y en su rendimiento. Se descubrió que no solo es importante tener un número de haces elevado junto con una buena precisión de la focalización y sincronización para producir una iluminación uniforme en el blanco, sino que la uniformidad de cada haz láser por separado es de vital importancia para evitar el crecimiento de inestabilidades hidrodinámicas (denominado *laser imprinting*) durante la compresión. Se desarrollaron técnicas y dispositivos como las *phase plates*, incoherencia espacial inducida (ISI, *Induced Spatial Incoherence*), suavizado mediante dispersión espectral (SSD, *Smoothing by Spectral Dispersion*) o suavizado por polarización (PS, *Polarization Smoothing*) para mejorar el perfil de intensidad de cada láser.
- Se profundizó en el estudio de inestabilidades hidrodinámicas como las de Rayleigh-Taylor y Richtmyer-Meshkov para mitigar su efecto durante la compresión de los blancos de fusión.

El objetivo de conseguir la ignición del combustible de fusión y finalmente obtener alta ganancia de energía en el blanco es el *leitmotiv* de cada diseño de un blanco de fusión nuclear. La ignición por sí misma es una combinación muy compleja de una fuente de alta temperatura de partículas alfa termonucleares que interactúan con el combustible de hidrógeno denso y frío que la rodea. El hecho de que todavía no se haya conseguido alcanzar la ignición de un blanco de fusión nuclear nos indica la complejidad de todo el proceso. Cada uno de los procesos físicos que intervienen en la fusión es bien conocido si se estudia aisladamente, pero en la ignición de un blanco de fusión estos procesos aparecen simultáneamente y de manera acoplada, haciendo que el estudio de

estos sistemas sea muy difícil.

Las últimas noticias que nos llegan desde la NIF, la instalación de FCI de referencia mundial, nos indican que se ha conseguido un diseño de fusión nuclear que ha alcanzado lo que se denomina “*breakeven*” sobre un blanco de FCI de iluminación indirecta. Alcanzar este hito significa que el blanco ha liberado más energía que la depositada por el láser en el combustible [7].

Para el lector que desee profundizar en el campo de la fusión nuclear por confinamiento inercial, se recomiendan dos artículos de resumen del estado de la fusión nuclear por confinamiento inercial, el primero de J. Lindl et al. sobre FCI de iluminación indirecta “*The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility*” [3] donde se da un resumen de los modelos y la tecnología y otro artículo de resumen escrito por R. S. Craxton et al. [2] que también se ha usado para redactar estas líneas. Existen otros artículos y resúmenes publicados sobre FCI de iluminación directa como los publicados por Atzeni y Meyer-ter-Vehn [4] sobre física de blancos, o los publicados por Guillermo Velarde [5][6] sobre la historia de la FCI.

3. CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE LA FCI

En cualquier sistema de FCI por iluminación directa (DD, *Direct-Drive*), un conjunto de láseres iluminan de manera muy precisa y uniforme un blanco que ha sido inyectado en la cámara de reacción. En general, la iluminación tendrá simetría esférica para optimizar la uniformidad de la iluminación, aunque esto no es totalmente necesario como indican los esquemas de ignición avanzados propuestos como puede ser la *polar ignition*. Después de la ignición y el quemado del combustible, el blanco libera la energía de fusión en forma de neutrones, partículas cargadas y rayos X. La pared de la cámara de reacción debe recoger esta energía y, a través de un manto envolvente, convertir esta energía en calor útil y producir tritio para cerrar el ciclo de combustible nuclear de fusión. Este proceso debe repetirse varias veces por segundo. Conseguir esto va más allá del desarrollo de un diseño de blanco directo de alta ganancia. Cabe destacar los siguientes aspectos tecnológicos y científicos que es necesario desarrollar para poder aprovechar la FCI:

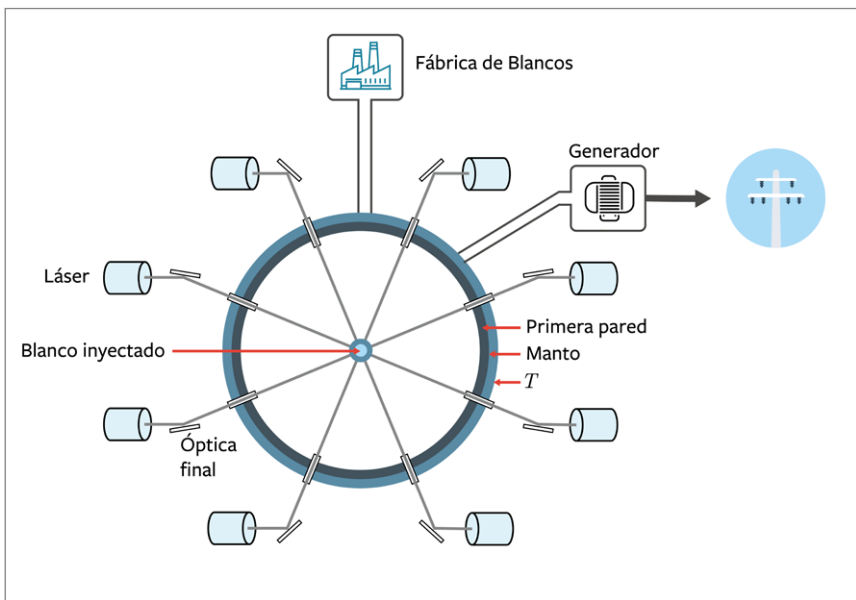
- Ganancia del blanco lo suficientemente alta como para producir energía para alimentar el láser y el proceso de conversión de energía, y además

producir una cantidad de electricidad suficiente que haga que el proceso sea rentable económicamente. Las estimaciones actuales establecen que el producto entre la eficiencia del láser y la ganancia en blanco debe ser superior a 10, asumiendo un rendimiento eléctrico del proceso de conversión del 40% y un 10% de ganancia adicional en el manto, para poder mantener la recirculación de energía por debajo del 25% del total de energía producido.

- Un *driver* que pueda alcanzar los requerimientos de fusión en términos de repetibilidad, durabilidad, eficiencia y costes además de cumplir los requerimientos del blanco sobre uniformidad de iluminación, frecuencia, ancho espectral y forma del pulso.
- Capacidad de fabricar la cantidad suficiente de blancos de manera económica, teniendo en cuenta una frecuencia de disparo de entre 5 y 15 Hz .
- Medios para asegurar que los blancos criogénicos puedan sobrevivir a la inyección en la cámara de reacción, manteniendo las propiedades adecuadas. Hay que tener en cuenta que la pared del reactor de fusión deberá operar a una temperatura superior a 800 K para asegurar una eficiencia térmica alta.
- Capacidad para posicionar el blanco y/o dirigir los haces láser para obtener la precisión y uniformidad de la iluminación requeridos.
- Desarrollo de una óptica final que sea capaz de aguantar la alta fluencia de los haces láser que la atraviesan y de la emisión de radiación que proviene del blanco.
- La primera pared de la cámara de reacción debe ser capaz de aguantar la emisión de radiación que proviene del blanco en cada disparo.
- Mecanismos para restablecer el ambiente de la cámara de reacción después de cada disparo.

- Desarrollo de un manto reproductor en la cámara de reacción que contenga de algún modo litio para poder regenerar el combustible quemado en cada disparo. El manto debe capturar los neutrones y producir suficiente tritio para tener un ciclo autosuficiente de combustible y por otra parte transferir la energía de la reacción al generador eléctrico.
- Sistemas para procesar el tritio producido en el litio del manto de la cámara de reacción y transportarlo a la cadena de producción de blancos.

Estos requisitos son independientes y cualquier concepto de reactor de FCI debe tenerlos en cuenta y dar soluciones viables. Además debemos contemplar otro tipo de exigencias como la viabilidad económica o la capacidad para licenciar el proyecto y poder explotar una planta de FCI.



A lo largo de la historia se han propuesto varios reactores de FCI, a continuación vamos a describir los más relevantes:

Figura 8.1 Componentes principales de un reactor de FCI de iluminación directa mediante láser.

BLASCON

Concepto de FCI propuesto por Lubin de la Universidad de Rochester y Frass de *Oak Ridge National Laboratory* en 1971. Es relevante porque este concepto fue propuesto justo antes de la desclasificación del concepto de compresión de blancos mediante láser. A pesar de ser poco realista, este primer concepto ya incluía la mayoría de los requerimientos descritos y que se han mantenido hasta hoy.

Los Alamos laser-driven fusion reactor: propuesto por Booth et al.

En este concepto se destacaba la importancia de la simetría de la iluminación del blanco, que la emisión de radiación del blanco estaba formada por iones y rayos X aparte de los neutrones de fusión, y que existen diversos tipos de láser que pueden ser utilizados para fusión.

SOLASE

Concepto desarrollado en la Universidad de Winsconsin en 1977, donde se realiza un extenso estudio de un reactor de FCI de 1000 *MWe*.

SIRIUS-T

También desarrollado en la Universidad de Winsconsin, en 1990 presentaron una instalación avanzada para la producción de tritio. Este concepto se basaba en el uso de láseres de KrF para iluminar de manera simétrica el blanco.

SOMBRERO

Concepto desarrollado en 1991 inicialmente por W. J. Schafer Associates junto con la Universidad de Winsconsin, General Atomics y Textron. Fue una variación del concepto previo SIRIUS-T para determinar si era posible la construcción de un reactor comercial de FCI.

Prometheus-L

Es un concepto de iluminación directa simétrica basado en un láser KrF de 4 *MJ* desarrollado por *McDonnell Douglas Aerospace* en 1994.

HALP (High Average Power Laser Program)

Es un programa iniciado de manera conjunta por el NRL (*National Research Laboratory*) y el LLNL (*Lawrence Livermore National Laboratory*) que se ha desarrollado desde 1999 hasta 2009. El objetivo era el desarrollo de un láser

de KrF de alta potencia media y de láseres de estado sólido DPSSL (*Diode Pumped Solid-State Laser*) que pudiesen cumplir los requerimientos de la FCI. El trabajo del NRL se amplió a un programa multi-institucional y multidisciplinar dedicado a estudiar el amplio espectro de aspectos necesarios para conseguir la FCI.

LFCI

Proyecto desarrollado en el LLNL desde 2009 hasta 2013 para el desarrollo de la tecnología necesaria para poder convertir el concepto de fusión nuclear por confinamiento inercial mediante láser desarrollado en el NIF en una planta de potencia comercial.

4. ACTUALIDAD DE LA TECNOLOGÍA DE LA FCI

En este apartado vamos a resumir brevemente el estado del arte de los componentes clave para la fusión nuclear por confinamiento inercial mediante láser para el caso de iluminación directa.

4.1 LÁSER

De acuerdo con el conocimiento actual, un láser aplicado a una planta de fusión nuclear debe tener las siguientes características:

- Poder dar una energía total en torno a $0,5 - 1,5 MJ$.
- Longitud de onda inferior a los $350 nm$ para un alto acoplamiento de la radiación láser con el blanco.
- Cada haz debe tener unas propiedades de uniformidad de la intensidad depositada que minimicen las modulaciones que se pueden producir en la iluminación, que alimentarían las inestabilidades hidrodinámicas.
- Capacidad de producir las formas del perfil láser requeridas por el diseño del blanco.
- Una eficiencia superior al 6%.

Las tecnologías láser disponibles para poder cumplir estos requisitos son los láseres de KrF y los DPSSL. La evolución de estas dos tecnologías hace plausible que puedan cumplir tanto las especificaciones de calidad de iluminación del blanco como los requerimientos de un reactor de FCI. Los láseres de KrF tienen una longitud de onda más corta además de un perfil láser muy suave de manera natural que limita las modulaciones en la deposición de energía. Otra ventaja de los láseres de KrF es que pueden hacer zoom durante la iluminación, adaptando el tamaño del spot láser a la zona de absorción láser del blanco a medida que evoluciona la compresión. Por otra parte en los DPSSL (que igualmente son capaces de hacer zoom) es necesario convertir el haz láser original de 1050 nm al tercer armónico para cumplir los requisitos de fusión. Por otra parte es necesario suavizar el perfil de intensidad del láser mediante técnicas de SSD. Debido a sus propiedades naturales, se ha establecido que la opción de láseres de KrF produciría mayor ganancia que los DPSSL en blancos de *shock ignition*. A pesar de esto, es necesario incluir otros factores como costes, eficiencia o escalabilidad a una planta de potencia para poder establecer cuál de las dos opciones es óptima.

4.2 ÓPTICA FINAL Y GEOMETRÍA DE ILUMINACIÓN

La óptica final del láser es el único elemento de este dispositivo que estará expuesto a la radiación producida en el blanco de fusión. El resto de dispositivos ópticos pueden protegerse. De los tres tipos de radiación que provienen del blanco, los neutrones son los que tienen la capacidad de producir mayor daño debido a que pueden desplazar las especies que forman la red cristalina fuera de su posición de equilibrio. Esto provoca hinchamiento y produce “centros de color”, comprometiendo la calidad de la iluminación en posteriores disparos. Para resolver este problema se han propuesto diversas soluciones, entre ellas GIMM (*Grazing-Incidence Metal Mirror*) que propone fabricar la óptica final con una base de SiC o Al recubierta de material altamente reflectivo. Otras opciones son el uso de lentes de Fresnel de gran diámetro a ambos lados de un material “*pinhole*” para el blindaje de neutrones.

4.3 BLANCOS DE FUSIÓN

Fabricación de blancos

Los blancos de fusión más comunes en los estudios de FCI se basan en cápsulas de material plástico rellenas de deuterio-tritio en estado sólido adherido en el interior de la cápsula. Los blancos de FCI deben ser producidos en masa, en una cantidad del orden del millón de cápsulas diarias (dependerá de la tasa de repetición). Existen en la actualidad dispositivos que son capaces de producir hasta 22 cápsulas de polietileno por minuto con la calidad adecuada para los diseños de blanco de alta ganancia. Se estima que el coste de fabricación de cada cápsula sería de unos 0,25 \$. Los métodos propuestos en la actualidad tienen la capacidad potencial de producir cápsulas en masa manteniendo el coste unitario bajo y con la posibilidad de ser adaptado para acoplarse a otras fases del proceso como el llenado de D - T y la solidificación del combustible. Se estima que la cantidad de tritio necesaria para operar una planta de FCI estará por debajo de 1 *kg* diario.

Inyección de blancos

Se puede inyectar un nuevo blanco en la cámara de reacción cuando la ráfaga de partículas creada por el blanco previo haya desaparecido. A un ritmo de 5 *Hz*, esto supone inyectar el blanco en la cámara a velocidades en el rango de 40 – 500 *m/s*, dependiendo del tiempo de recuperación. El blanco es frágil y está en estado criogénico, por lo que necesitará un aislante protector para su inyección. General Atomics ha demostrado que puede realizarse la inyección con estos requisitos mediante pistolas de gas.

Posicionamiento de blancos

General Atomics y la Universidad de California en San Diego han demostrado que es posible realizar el seguimiento del blanco y hacer que se posicione con la precisión requerida, con las tasas de repetición adecuadas para una instalación comercial de FCI.

Supervivencia del blanco en la cámara

El blanco debe mantenerse en todo momento a temperatura inferior al punto triple del D - T (19,79 *K*). El momento de la inyección es especialmente crítico porque la radiación térmica de las paredes de la cámara de reacción puede producir un calentamiento indeseado del blanco. Algunas propuestas se basan en inyectar blancos a 16 *K* y dejar que se calienten hasta los 19 *K* durante la

inyección. Se han llevado a cabo experimentos en LANL (*Los Alamos National Laboratory*) que sugieren que la temperatura de la cápsula puede mantenerse por debajo del punto triple durante su inyección. En estos experimentos los blancos no se han degradado después de 20 ms (tiempo de vuelo estimado para atravesar los $5,5\text{ m}$ de radio de la cámara de reacción) de exposición a una fuente de calor equivalente a la de un reactor FCI. Durante este tiempo la cápsula ha elevado su temperatura en 3 K . Por lo tanto blancos a 16 K pueden sobrevivir en el entorno de la cámara de reacción y producir ignición.

4.4 CÁMARA DE REACCIÓN: PRIMERA PARED

La cámara de reacción es el dispositivo más complicado de diseñar en una planta de FCI. Cumple seis funciones principales:

- Asegurar la supervivencia del blanco.
- Permitir que la energía del driver se acople de manera eficiente al blanco.
- Resistir de manera repetida la emisión de rayos X, iones y neutrones que provienen de la ignición del blanco.
- Recuperar las condiciones para el siguiente disparo.
- Estar preparada para soportar dispositivos que permitan la conversión de la energía a electricidad.
- Aportar métodos para poder producir y recuperar tritio.

Los diseños más comunes de cámaras de reacción tienen una primera pared que resiste la emisión de radiación que le llega de manera directa, un recubrimiento donde se producirá el tritio y una estructura que soporte el sistema en su conjunto. El diseño de la cámara y el diseño del blanco están muy relacionados, porque el espectro de partículas que debe soportar la primera pared depende del tipo de blanco usado. En una planta de FCI de iluminación directa aproximadamente el 75% de la energía que llega a la primera pared lo hace en forma de neutrones, el 23% en forma de iones y el 2% como rayos X. El mayor riesgo de la pared a corto plazo es la carga térmica producida por los rayos X y los iones que depositan toda su energía sobre un espesor muy fino (en las 5 primeras micras de la pared) y en un intervalo de tiempo muy

corto, inferior al microsegundo. Los neutrones depositarán su energía en todo el volumen de la primera pared y del manto, por lo que no producen cambios súbitos en la carga térmica. La carga promedio producida por neutrones es similar tanto en FCI como en FCM, siendo la gran diferencia que en la primera tecnología el depósito de energía es pulsado y en la segunda, continuo. También existe un riesgo para la primera pared a largo plazo debido al daño neutrónico acumulado sobre el material, que puede modificar apreciablemente las propiedades mecánicas de los materiales que la componen y hacerla inservible. Las principales propuestas para la configuración de la cámara de reacción se presentan a continuación, siendo las más relevantes las tres primeras:

- Pared seca y cámara en vacío.
- Frenado magnético y cámara en vacío.
- Pared seca y cámara con gas.
- Pared seca recambiable y cámara en vacío.
- Pared líquida.

4.5 MANTO REPRODUCTOR

Los mantos de Pb-17Li (83% Pb, 17% Li) y de FLIBE (Flúor-Litio-Berilio) han sido evaluados específicamente para FCI de iluminación directa con reproducción de tritio y conversión de energía. El tritio se produce por la reacción de los neutrones con el litio que forma parte del manto. Estas reacciones además liberarán una cantidad de energía extra. También pueden añadirse materiales al manto como el Be o el Pb que multipliquen el número de neutrones para aumentar la producción de tritio o incrementar la multiplicación de energía producida. En principio, lo que se necesita es una tasa de reproducción de tritio (TBR, *Tritium-Breeding Ratio*) promedio superior a 1, aunque valores superiores pueden ser necesarios en el momento de iniciar nuevos reactores de fusión nuclear. En operación continua, un TBR de 1,05 debe ser suficiente. Esto significa que el TBR local en ciertas partes del manto debe ser del orden de 1,5 para compensar las partes de la cámara de reacción que no están cubiertas por el manto (puertos de entrada de láser o diagnóstico o inyección de blancos).

Actualmente se han propuesto nuevos conceptos de conversión de energía.

Todos se basan en un ciclo de Brayton con tres etapas de compresión y dos de *intercooler*. Una de las propuestas usa acero convencional de baja activación F82H con una armadura de wolframio, que funcionaría a una temperatura de 550 °C con una eficiencia de conversión de energía del 38%. Otro concepto usa aceros ferríticos avanzados junto con una armadura también de wolframio, que permite temperaturas más elevadas de 700 °C y mayores rendimientos, de hasta el 49%. Incluso existen diseños basados en compuestos de SiC que podrían alcanzar los 1000 °C y rendimientos del 50%.

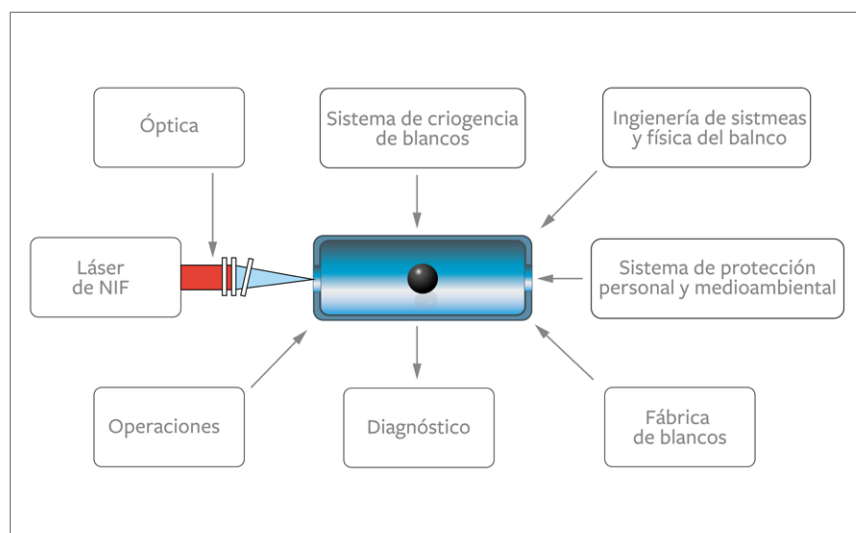
5. NATIONAL IGNITION FACILITY

Actualmente la instalación de fusión nuclear por confinamiento inercial de referencia es NIF, situado en el LLNL, en California, EE. UU. Su construcción comenzó en 1997, realizando su primer disparo en 2003 usando un único haz láser. En enero de 2009 se completó la construcción de NIF, estando disponibles sus 192 haces láser. Estos haces láser están dispuestos en 48 “quads” (grupo de 4 haces). Cada haz láser es capaz de depositar 44 kJ de radiación infrarroja (1050 nm), que cuando se convierte en radiación ultravioleta (350 nm) se reduce a 10,4 kJ por haz, lo que da lugar a aproximadamente 2 MJ de energía total en el UV (el láser con mayor energía del mundo). La cámara de reacción de NIF permite configuraciones de láser para iluminación directa e indirecta. El láser de NIF se basa en la tecnología de láser de estado sólido de neodimio-vidrio (Nd:glass) bombeado por lámparas de flash, resultando en una eficiencia de, aproximadamente, el 1%.

La amplificación principal tiene lugar en una serie de pasadas por los amplificadores de vidrio. Antes de lanzar el haz láser que hace de semilla, los amplificadores se activan ópticamente mediante lámparas de flash que producen una inversión de población en el amplificador. En cada pasada del haz, éste adquiere más energía que toma del amplificador, donde se ha acumulado en forma de inversión de población. La instalación NIF posee dos bahías con los sistemas de amplificación láser.

5.1 NATIONAL IGNITION CAMPAIGN

En la *National Ignition Facility* se han realizado los experimentos sobre fusión nuclear más recientes y en concreto se ha desarrollado un programa de investigación a escala nacional (NIC, *National Ignition Campaign*) con el fin de alcanzar ignición que involucraba a laboratorios como LLNL, LANL, SNL (*Sandia National Laboratory*), LLE (*Laboratory for Laser Energetics*) y General Atomics entre otros. Este programa se inició en el año 2005 y se cerró en 2012. Los objetivos de la NIC eran alcanzar la ignición y el quemado termonuclear de un blanco de FCI en el laboratorio y de esta manera desarrollar una plataforma para ignición y para aplicaciones de HED (*High Energy Density*, alta densidad de energía) en NIF.



El programa NIC supuso un esfuerzo investigador enorme para alcanzar la ignición, pero no dio los frutos esperados. Después de un informe negativo del DOE (*Department of Energy*, departamento del gobierno de EE. UU. del que depende la investigación en FCI) en julio de 2012 donde se afirmaba que la probabilidad de que se obtuviese ignición a finales de 2012 era muy baja, el programa finalizó en septiembre de 2012 sin alcanzar la ignición. Como consecuencia de esto, el desarrollo del reactor conceptual LFCI también se detuvo.

A partir de la finalización de la NIC, la instalación NIF se centró en el estudio

Figura 8.2 Los elementos de la NIC

de materiales y en experimentación en ciencia básica y HEDP (*High Energy Density Physics*).

6. CONCLUSIONES

La historia de la FCI se ha desarrollado durante más de 50 años durante los cuales se ha variado ampliamente las líneas de desarrollo en función del nuevo conocimiento científico generado. Entre los avances que han hecho evolucionar la FCI hasta lo que es hoy se destaca:

- El increíble desarrollo de la tecnología láser que ha hecho posible la construcción de instalaciones como NIF cuyas características parecía imposible alcanzar hace 25 años.
- La mejora en los métodos de diagnóstico de los experimentos en FCI que han permitido conocer cada vez más en detalle qué es lo que ocurre en el interior de un blanco FCI.
- El avance en el conocimiento teórico sobre la física de blancos de FCI junto con el desarrollo de herramientas computacionales cada vez más potentes. De esta manera ha sido posible optimizar cada vez más el diseño de los blancos empleados en los experimentos de FCI.

El objetivo más inmediato de la investigación de FCI es alcanzar la ignición del combustible de fusión del blanco, momento en el que se produce una onda de quemado que consume la mayor parte del combustible y por tanto que se liberen grandes cantidades de energía. Este objetivo todavía no ha sido alcanzado aunque se han dado pasos en esa dirección como el mencionado “*scientific breakeven*” (2013) en el cual la energía obtenida del blanco iguala a la energía que el driver ha depositado en el blanco. Pero el hecho de que la NIC no haya conseguido la ignición ha hecho que la financiación de proyectos de investigación en FCI haya disminuido. De hecho, el tiempo de uso de NIF para experimentación en FCI ha disminuido en favor de su uso para experimentos sobre ciencia de materiales o física de alta densidad de energía. Por otra parte existe una competencia entre las dos tecnologías de fusión FCI/FCM por

demostrar cuál tiene mayor viabilidad. Debido a las grandes necesidades de financiación que requieren el desarrollo de cualquiera de las dos tecnologías, los gobiernos se ven obligados a dar prioridad al desarrollo de una de ellas para poder optimizar sus presupuestos de investigación en energía.

Actualmente es necesario avanzar en el conocimiento teórico del proceso de FCI para poder optimizar el diseño de blancos de manera que se pueda alcanzar la ignición. Debemos conocer con mayor detalle los procesos físicos que ocurren durante la iluminación y compresión de un blanco de FCI. Por otra parte es necesario continuar con el desarrollo de la tecnología láser para poder mejorar el acoplamiento de la radiación láser con el blanco y poder diseñar una iluminación del blanco cada vez más eficiente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] “Laser compression of matter to super-high densities: Thermonuclear (CTR) applications” J. Nuckolls et al. Nature 239, 139 (1972). [Volver a página 144](#)
- [2] “Direct-drive inertial confinement fusión: A review”, R. S. Craxton et al. Physics of Plasmas 22, 110501 (2015); doi: 10.1063/1.4934714 [Volver a página 146](#)
- [3] “The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility”, J. Lindl et al. Physics of Plasmas 11, 339 (2004); doi: 10.1063/1.1578638 [Volver a página 146](#)
- [4] “The Physics of Inertial Fusion: Beam Plasma Interaction, Hydrodynamics, Hot Dense Matter, International Series of Monographs on Physics” S. Atzeni and J. Meyer-ter-Vehn, (Clarendon Press, Oxford, 2004). [Volver a página 146](#)
- [5] “Nuclear Fusion by Inertial Confinement: A Comprehensive Treatise”, edited by G. Velarde, Y. Ronen, and J. M. Martínez-Val (CRC Press, Boca Raton, FL, 1993). [Volver a página 146](#)
- [6] “Inertial Confinement Nuclear Fusion: A Historical Approach by Its Pioneers”, G. Velarde and N. Carpintero-Santamaría, (Foxwell & Davies (UK) Ltd., London, 2007). [Volver a página 146](#)
- [7] “Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion”, O. A. Hurricane et al. Nature 506, 343–348 (20 February 2014) doi:10.1038/nature13008 [Volver a página 146](#)
- [8] National Ignition Campaign Program Completion Report, NNSA Sep 2012

BIBLIOGRAFIA DE FIGURAS

- [8.1] Elaboración propia
- [8.2] Tomada de: [8]

9 - FUSIÓN NUCLEAR Y DESARROLLO SOSTENIBLE

Alfonso Barbas Espa
Autor

Kevin Fernández-Cosials
Revisor

1. INTRODUCCIÓN

Es preciso advertir al lector de que, durante la primera parte del presente capítulo, se va a dejar ligeramente de lado el tratamiento estrictamente técnico para valorar, de una forma más profunda, el concepto de Desarrollo Sostenible (en adelante DS) definido de forma completa en el informe Brundtland de 1987 [1]. Quizá un enfoque meramente técnico hubiera podido ser suficiente, pero el autor considera que se le hace un flaco favor al maltratado concepto de DS si se perpetúan las visiones reduccionistas o sesgadas del mismo, estrategia útil para aquellos que buscan reconstruir el significado con el nefasto fin de aprovechar para sus propios intereses el valor social adquirido por el signifiicante. Esta opinión es la de muchos autores: Herman E. Daly, economista del crecimiento cero, expone que la sostenibilidad “es uno de esos nombres abstractos y problemáticos como la justicia, la verdad y la belleza” [2] y también que “aunque hay un emergente consenso político en lo deseable de algo llamado desarrollo sostenible, este término - promocionado por muchos e incluso institucionalizado en algunos lugares - es todavía peligrosamente vago” (citado en [3]). Licencia que él mismo utilizará más adelante para deformar a su gusto el concepto cuando habla de la sostenibilidad del rendimiento físico de los sistemas naturales frente a la de las utilidades humanas [2]. Jorge Riechmann, por su parte, lo describe como un “concepto esencialmente discutible” [4] en el sentido de W. B. Gallie [5]. El propio informe Brundtland, en un

hábil ejercicio de flexibilidad política, admite que *“las interpretaciones [sobre los objetivos del desarrollo económico y social] pueden variar, pero deben compartir ciertas características generales y resultar de un consenso sobre el concepto básico de desarrollo sostenible”* (2:2). Un estudio exhaustivo y no interesado de la evolución histórica del concepto de DS conduce a una única y clara definición, aunque no sea así con las medidas y criterios que de él se deduzcan. Comenzaremos por tanto con una introducción al concepto de DS y su historia. Entendiendo asumida al menos una parte de su valor, retomaremos la senda más técnica que han recorrido los capítulos precedentes para analizar las aportaciones que la energía obtenida mediante la fusión nuclear puede hacer a las diferentes facetas que encierra el concepto del DS.

2. EL CONCEPTO DEL DESARROLLO SOSTENIBLE

Para comprender en profundidad las implicaciones filosóficas del concepto de DS, es preciso recorrer las principales influencias que se advierten en su construcción. El resumen que se presenta a continuación viene esencialmente recogido en el trabajo de D. Mebratu [3].

2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS E INFLUENCIAS

La primera referencia que D. Mebratu se inclina a buscar es la religiosa. Como suele ser habitual, en los textos de base de las principales religiones se pueden encontrar sentencias tanto en el sentido más antropocéntrico de dominación del hombre sobre la naturaleza, como en el contrario. Destaca, de la tradición judeo-cristiana, el pasaje bíblico *“y los bendijo Dios, y les dijo: Fructificad y multiplicaos; llenad la tierra, y sojuzgarla, y señoread en los peces del mar, en las aves de los cielos, y en todas las bestias que se mueven sobre la tierra”,* ([6] Gn 1, 28) pero autores como R. Gottlieb (citado en [3]) destacan también aspectos de estas religiones en el sentido contrario. D. Mebratu establece la comparación entre la visión centrada en el ser humano (y hay quien añadiría especista¹) de algunas de las religiones mayoritarias y la perspectiva más naturalista o global de las tradiciones indígenas y el saber tradicional, que

1 El término especieismo fue introducido en 1979 por José Ferrater Mora en su diccionario de filosofía, aunque actualmente se utiliza en mayor medida especismo. Refleja una corriente filosófica comenzada por Richard D. Ryder y Peter Singer en 1970 que habla de la discriminación basada en la especie; en humanos es la infravaloración de los intereses de quienes no pertenecen a la especie *Homo sapiens*. Propone modificar los condicionantes morales para extender a los “seres sintientes” las fronteras del derecho y así proteger a los animales de la opresión ejercida por la humanidad

sugieren un desarrollo social en armonía con el medio ambiente.

Uno de los autores que han trazado el camino hacia el concepto de DS es Thomas Malthus (1766-1834): el primer economista en considerar los límites físicos del medio ambiente en el marco de la teoría económica. Aunque los avances técnicos han retrasado sus predicciones sobre las consecuencias de la superpoblación o la escasez de alimentos, y la vehemencia en sus posturas sobre el control demográfico no sean actualmente protagonistas en el acervo cultural (desde 2015 China ha modificado su restricción sobre la natalidad), su teoría sobre los límites del medio ambiente y sus consecuencias en el sistema económico y social está en la misma génesis del DS.

También es posible encontrar importantes aportaciones a la formación del concepto de DS en la tradición económica menos ortodoxa. Ernest F. Schumacher (citado en [3]) introduce el término “*Tecnología Adecuada*”, que reclama la importancia del control ético del crecimiento científico-tecnológico frente a la consideración del crecimiento como un valor en sí mismo. Esta postura moderada destaca en el seno de los movimientos contraculturales de las décadas de los 60 y 70 y puede encontrarse en la idea expresada en el informe Brundtland [1] a propósito de que “*la dirección de la evolución tecnológica puede resolver algunos problemas inmediatos, pero también provocar otros mayores. Grandes sectores de la población pueden resultar marginados a causa de un desarrollo mal concebido*” (2:8).

2.2 EL CAMINO DESDE 1948 A 1987

El pensamiento humano se desarrolla con frecuencia en respuesta a las grandes crisis. Aunque a lo largo de la historia ha habido movimientos (fundamentalmente de carácter cultural o religioso) basados en la solidaridad sincrónica², el movimiento de síntesis definitivo (aquel con carácter político e internacional) solo pudo llegar después de los trágicos acontecimientos de la Segunda Guerra Mundial, plasmándose en la Solemne Declaración Universal de los Derechos Humanos de 1948 (en adelante DDHH). Se podría decir que con este paso, la humanidad como colectivo alcanzó un estado comparable a la adolescencia, reconociendo sus propios derechos.

Es posible llegar al concepto de solidaridad diacrónica³ de forma sencilla y

2 La solidaridad sincrónica es aquella referida a la solidaridad y la igualdad de oportunidades entre las personas de una misma generación, es decir, aquellas que en cada momento pueblan la Tierra

3 La solidaridad diacrónica es aquella referida a la solidaridad y la igualdad de oportunidades entre la generación actual y las siguientes



elegante si se desarrolla el concepto de solidaridad sincrónica en un sentido similar al que en su momento A. Einstein utilizó al considerar el tiempo como una dimensión adicional a las del espacio. Más allá de juegos retóricos, la extensión temporal de los DDHH a las generaciones por venir es uno de los pasos más significativos del conjunto de la especie humana y es aquí, como demostraremos más adelante, donde debemos buscar el eje conceptual del DS. Este paso, en el sentido de la metáfora anterior, constituye la entrada en la “edad adulta” de la humanidad como colectivo. En [1] se incluyen ambos conceptos de solidaridad en el punto (2:3): *“Aun el estrecho concepto de durabilidad física implica la preocupación por la igualdad social entre las generaciones, preocupación que debe lógicamente extenderse a la igualdad dentro de cada generación”*.

Para completar el concepto de solidaridad diacrónica es preciso añadir el hecho de que los ciclos del sistema terrestre están limitados por los aportes energéticos del Sol y la capacidad biológica de recuperación de los ecosistemas (por ejemplo en la asimilación de las sustancias provenientes de los procesos humanos), por lo que, pensando en generaciones futuras, este hecho debe ser tenido en cuenta.

Que éste es el sentido real del concepto de DS queda suficientemente claro cuando se acude al antecedente histórico directo del informe Brundtland: ya en la Declaración de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano de 1972 [7] se recogían los componentes constitutivos del DS cuando se concluyó que *“La defensa y el mejoramiento del **medio humano** para las **generaciones presentes y futuras** se han convertido en meta imperiosa de la humanidad, y ha de perseguirse al mismo tiempo que las metas fundamentales ya establecidas de **la paz y el desarrollo económico y social** en todo el mundo, y de conformidad con ellas”* (6ª proclama, resaltado propio). Y en el primer principio de toda la declaración son los DDHH los que se esgrimen como motivo fundamental: *“El hombre tiene derecho fundamental a la libertad, la igualdad y el disfrute de condiciones de vida adecuadas en un medio de calidad tal que le permita llevar una vida digna y gozar de bienestar, y tiene la solemne obligación de proteger y mejorar el medio para las generaciones presentes y futuras”*.

Los conceptos antes citados se desarrollarán en el informe Brundtland hasta llegar a la conocida definición del DS como aquel que *“satisface las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones*



futuras para satisfacer sus propias necesidades” ([1] 2:1) aunque más concreta es la que lo define como un “proceso de cambio en el cual la explotación de los recursos, la orientación de la evolución tecnológica y la modificación de las instituciones están acordes y acrecientan el potencial actual y futuro para satisfacer las necesidades y aspiraciones humanas” ([1] 2:15).

“De entre todas las cosas del mundo, los seres humanos son lo más valioso” (5ª proclama) es la radical afirmación que en [7] introduce a la ya citada 6ª proclama sobre el DS. El ser humano debe ser por tanto el motivo fundamental del DS y expresar dudas o arrojar oscuridad sobre esta verdad solo puede ser resultado de una voluntaria o incompetente mala interpretación.

2.3 DS COMO CONJUNCIÓN DE LOS SISTEMAS SOCIAL, MEDIOAMBIENTAL Y ECONÓMICO

Las ideas contenidas en [1] han sido desarrolladas en diversas direcciones. Una de las más conocidas y utilizadas es la dada por el Instituto Internacional para el Medio Ambiente y Desarrollo (IIED por sus siglas en inglés) que considera compatibles con el DS aquellas medidas que mantienen el equilibrio entre tres sistemas involucrados: el social, el medioambiental y el económico. Aunque esta clasificación puede ayudar a ordenar y comprender mejor las medidas y los ámbitos de aplicación del DS, incorpora el riesgo de dejar de lado uno de los conceptos más importantes introducidos por el informe Brundtland que es precisamente el de la interacción mutua entre estos sistemas y la necesidad de no considerarlos como sistemas independientes. Esta idea de que *“muchos problemas de agotamiento de recursos y presión sobre el medio ambiente son efectos de las disparidades en cuanto a poder económico y político”* (2:16), demostrada con múltiples ejemplos a lo largo del informe (ver 1:8, 1:14-21, 2:4...), viene a confirmar que no se pueden abordar los problemas de uno de estos sistemas de forma independiente, sino que la solución puede y debe buscarse en la consideración de todos los sistemas como un conjunto. Es innegable que este riesgo de simplificar el problema ya ha afectado negativamente a algunas estrategias de desarrollo que no lo abordan de una forma completa o suficientemente ambiciosa.

Otra crítica hacia esta simplificación radica en que sugiere una consideración homogénea en cuanto a la importancia relativa de los tres sistemas. La llamada



a “mantener el equilibrio” así como las representaciones gráficas que se utilizan contribuyen a forjar la idea de que los tres sistemas (social, medioambiental y económico) tienen la misma importancia en el marco del DS. Esta idea es perfectamente legítima, pero por todo lo expresado hasta aquí demuestra ser errónea en cuanto a lo que el DS se refiere. El DS, en definitiva, es el conjunto de estrategias encaminadas a asegurar el cumplimiento actual y futuro de los DDHH, asumiendo que esto se tendrá que hacer en un escenario con normas prefijadas (el del medio ambiente humano) y con herramientas humanas como lo son la economía y la tecnología. La influencia de los sistemas **económico** y **ambiental** en la posibilidad de cumplir los DDHH lleva a la necesidad de cumplir sus exigencias con tanta firmeza como las **sociales**, pero entendiéndolas siempre subyacentes al objetivo principal. Baste como demostración observar la clara connotación social de los 17 objetivos del desarrollo sostenible establecidos en la agenda en Septiembre de 2015 (ver figura 9.1).

3. EL PAPEL DE LA ENERGÍA EN EL DESARROLLO SOSTENIBLE



Figura 9.1 Objetivos del Desarrollo Sostenible



“Llevar acceso a formas modernas de energía a los más de 1 300 millones de personas que carecen de ella es un elemento clave en la lucha contra la pobreza, ya que permite abordar simultáneamente varios de los problemas que afectan a este colectivo (salud, educación, desarrollo económico, desarrollo de la mujer, etc.) y atajar algunos efectos negativos que afectan a la seguridad de las naciones (abandono del medio rural, grandes migraciones, epidemias, etc.)” ([8] p97).

Como ha quedado escrito, el DS debe ser una estrategia integral que someta a juicio la estructura social y económica en su conjunto. Cualquier sistema energético debe ser analizado desde el punto de vista de sus repercusiones a nivel social económico y ambiental pero a nivel general es posible afirmar que el acceso a una fuente de energía limpia como la electricidad, principal vector energético actual, es una condición *sine qua non* para el cumplimiento de los DDHH en cualquier parte del mundo (ver diversos argumentos en [8]) Las estrategias primeras deben ir por tanto encaminadas a garantizar que la estructura política y económica internacional facilite este acceso en los países sin medios propios suficientes.

Cuando hablamos de sistema energético de un país nos referimos al conjunto de tecnologías que conforman el mix, a la calidad y extensión del sistema de distribución, a la regulación del mercado y al sistema de ayudas sociales que aseguren la universalidad del acceso. Todos estos factores son cruciales en la sostenibilidad del sistema y deben ser coherentes con las condiciones materiales del país. En este sentido no es posible transferir políticas entre países sin antes evaluar las diferencias sociales, económicas y medioambientales existentes. En la estrategia energética se deben tener en cuenta, por tanto, las condiciones sociales del país (capacidad técnica y regulatoria, acuerdo social...), las económicas (nivel de desarrollo industrial, modelo productivo...) y las medioambientales (recursos solar, eólico e hídrico disponibles, etc.). Los elementos esenciales que se proponen en [1] para un sistema energético sostenible son (7:4):

- El acompasamiento de la oferta y la demanda creciente (aumentando el suministro en lo necesario pero así mismo abogando por estrategias de eficiencia en la producción y uso de la energía).



- El reconocimiento de los problemas de salud creados y la protección de la biosfera, especialmente ante las formas de contaminación más localizada.

El problema de la localización de la contaminación es especialmente relevante en las ciudades de todo el mundo dado que atenta de manera directa e inmediata sobre la calidad de vida y la salud de las personas. *“Los problemas de contaminación relacionados con el aire, el agua, el ruido y los desechos sólidos han aumentado rápidamente y pueden tener consecuencias dramáticas para la vida y la salud de los habitantes de la ciudad, para la economía y para sus empleos”* ([1] 9:12). La solución, aunque parcial, que resolvería el problema sería sustituir en los usos residencial y de transporte urbano los combustibles fósiles por vectores energéticos limpios como la electricidad o el hidrógeno, pero las condiciones físicas del hidrógeno, su alta reactividad y dificultad de almacenamiento, así como el camino tomado actualmente por la industria del transporte, hacen pensar que se utilizará la electricidad y las redes de suministro eléctrico de las próximas décadas deberán suministrar considerablemente más potencia que las actuales. Una aclaración importante a este respecto es la de que, como se ha indicado en puntos anteriores, ha de sopesarse siempre la relación entre los sistemas. En este sentido, la transición hacia la electricidad no debe hacerse a través de medidas regresivas que pongan en peligro a los más desfavorecidos de cada comunidad.

La estrategia que se ha seguido en Europa a la hora de diseñar los planes de transición energéticos de cada país ha sido la de establecer los tres criterios *“comúnmente aceptados, aunque con prioridades diversas, de seguridad de suministro, competitividad y protección del medio ambiente”* ([9] p31) que podríamos, de alguna manera, relacionar con los tres sistemas de la sostenibilidad propuestos por el IIED. Es preciso señalar que la forma de entender estos objetivos, aun a nivel nacional, no es suficiente para asegurar las condiciones del desarrollo sostenible, dado que no se comprende la universalidad del acceso como un objetivo del sistema, sino como una cuestión externa de carácter social.

Una última cuestión que debe ser tomada en cuenta a la hora de considerar la planificación de un sistema energético sostenible es la de las inercias y la capacidad de reacción del sector. Los altos costes de inversión de las diferentes tecnologías, así como sus tiempos de construcción y amortización requieren



de un marco regulatorio estable en el tiempo y esto lleva a la necesidad de una planificación del sistema energético con unos plazos tan largos que, al escapar muy por encima de los ciclos electorales de la democracia, debe descansar necesariamente en un pacto de Estado que a su vez cuente con un apoyo popular libre e informado.

4. LA ENERGÍA DE FUSIÓN NUCLEAR

En cuanto a la energía de fusión nuclear y el DS es preciso analizar qué relación tiene esta tecnología con los objetivos anteriores. También cabría preguntarse, en el sentido del concepto de “tecnología adecuada”, si merecen la pena los ímprobos esfuerzos humanos y económicos puestos en el desarrollo de la fusión nuclear.

En el sentido anterior, surgen críticas que tratan de reclamar el coste de la investigación como parte de los costes posteriores de la tecnología. Es preciso indicar que las grandes investigaciones que se llevan a nivel internacional, ya sean de física básica (como la que se hace en el CERN) o más aplicadas, constituyen no solo una importante inversión en industria que retorna en forma de trabajo y formación la cantidad invertida, sino también una fuente inagotable de tecnologías extras que se desarrollan de forma paralela al objetivo principal. El ejemplo más claro de la importancia de estos desarrollos paralelos es la creación de la *World Wide Web* en el CERN en 1990 [10].

Como fuente de energía de origen nuclear, la fusión conlleva ciertas ventajas e inconvenientes intrínsecos en cuánto al DS que deben considerarse. Por un lado, la extraordinaria densidad de energía y la ausencia de emisión de gases contaminantes durante la operación son sus más claras ventajas. Por otro, sobre el concepto de “nuclear” siempre planean las sombras de la proliferación militar, la seguridad en las plantas y la gestión de los residuos radiactivos.

La inmensa densidad de potencia de estas fuentes las convierte en ventajosas desde el punto de vista de la independencia energética de un país⁴, ya que tanto el factor económico como el volumétrico incentivan el almacenamiento de la materia prima necesaria para largos periodos. Esta extraordinaria densidad aporta otras ventajas que actualmente no están urgentemente relacionadas con el DS⁵ aunque podrían llegar a estarlo en un futuro no tan lejano.

La gran mayoría de procesos industriales tienen, como producto indeseado,

4 Entendiendo que exista la capacidad técnica de operar y mantener las centrales

5 En el caso particular de la fusión, si se consiguiese en un futuro la disminución del volumen del medio tecnológico necesario para su aprovechamiento, podría situarse en el primer puesto, que ahora ocupa la fisión, para desarrollar tecnologías de alta demanda en viajes espaciales

una cola de desechos inutilizables que de ser liberados pueden poner en peligro la estabilidad de los ecosistemas o incluso la salud de las personas tanto a nivel local como regional o incluso mundial. Éstos se pueden dividir en aquellos que son contaminantes en el sentido de que no es contemplable su retención y por tanto deben ser liberados al medio y aquellos que solo lo son potencialmente dado que sus características físicas permiten su gestión y confinamiento. Debido a su activa participación en el efecto invernadero, la captura de los gases producidos en la combustión de hidrocarburos es una de las vías que se han ensayado y descartado recientemente. Efectivamente, a día de hoy no parece cercana una tecnología que permita retener y confinar emisiones gaseosas de gran volumen, por lo que, dada la urgencia en reducir el calentamiento global y las lluvias ácidas, las tecnologías que contienen estos gases entre sus productos deben ser paulatinamente sustituidas. La mayor ventaja actual de las fuentes de origen nuclear es la ausencia de CO_2 y otros gases contaminantes en su cola de producción. No obstante, otra forma de contaminación compartida por todas las centrales térmicas cualquiera que sea su tecnología, es precisamente su efecto de calentamiento de las fuentes de agua cercanas conocidas como foco frío. En el caso de que este calentamiento afecte de forma negativa a cualquier ecosistema debe ser objeto de regulación y control. Uno de los frecuentes argumentos en contra de las tecnologías de origen nuclear es la posibilidad de construcción de armas de destrucción masiva. Sin embargo, no hay ningún proceso tecnológico en la fusión, más allá de la obtención de deuterio de fuentes naturales o la generación de tritio, que resulte coincidente con la fabricación de tales armas. El alto nivel de control internacional ha resultado una medida eficaz en este sentido.

En concreto, se argumenta el doble uso militar-civil en contra de la FCI por investigarse en el NIF, misma instalación donde se realizan pruebas militares relacionadas con bombas termonucleares. Este argumento resulta falaz, ya que se usa la coincidencia geográfica para extender por generalización la característica belicista. En esas mismas instalaciones se hacen experimentos de astrofísica que nos permiten conocer mejor los procesos estelares y a nadie se le ocurrirá nunca tachar a la astronomía de militarista por ello.

En lo referente a la seguridad en las plantas, las exigentes condiciones requeridas para la fusión hacen que sea una energía extremadamente segura, sin problemas relacionados con la criticidad o el calor residual de que adolece su hermana la fisión nuclear. Estos mensajes tal vez no sean lo suficientemente



conocidos por la sociedad y, en opinión del autor, una campaña informativa debería tener éste como mensaje de primera línea.

En la cola de los procesos nucleares para generación de energía, así como durante el desmantelamiento de las instalaciones una vez terminado su periodo de operación, se generan residuos que, por su contenido en radioisótopos, resultan peligrosos y deben ser gestionados con procesos específicos. En el caso de la fusión nuclear estos residuos se generan en baja proporción y en ningún caso tendrán periodos de vida que excedan los centenares de años, por lo que la solución tecnológica para ellos es sencilla y conocida y no requiere de nuevos desarrollos. Su existencia no obstante obliga a la existencia de un organismo independiente en cada país que asegure el correcto tratamiento de estos residuos.

La materia prima de cualquier fuente de energía constituye la base de sus ventajas e inconvenientes. La disponibilidad y las reservas existentes, los efectos ambientales de los procesos de extracción, las consecuencias políticas de su reparto geográfico y los costes posteriores de su transporte y manipulación condicionan fuertemente su sostenibilidad. Como se ha explicado en los capítulos anteriores, las materias primas de la fusión nuclear son, en primera instancia, la propia agua del mar y el litio. Desde el punto de vista de las reservas mundiales, el propio informe Brundtland considera a la fusión, como a la fisión en reactores reproductores, como una energía sostenible en el sentido de que las reservas de materia prima son tan elevadas que podrían durar, bajo cualquier consumo imaginable, tiempos similares a la vida del sistema solar⁶ ([1]7:3). La energía está en la misma base de los sistemas productivos industrializados y tiene por ello una gran importancia a nivel económico. Esto hace que la posesión de las fuentes de explotación de la materia prima (como en el caso de los combustibles fósiles) se convierta en una fuerte palanca de presión política y en ocasiones esté en el origen de conflictos armados y de medidas opresivas que llevan a movimientos de carácter violento a nivel mundial. La dispersión de las materias primas de la fusión podría colaborar en la disolución de muchas de estas tensiones. Otro punto positivo de la fusión es compartido con la fisión nuclear: el reducido coste de la materia prima con respecto a los gastos en construcción o mantenimiento hacen que el precio de la energía de origen nuclear sea extraordinariamente estable frente a cambios en el mercado de sus respectivas materias primas.

6 En el sentido de la durabilidad del combustible, el ${}^6\text{Li}$ necesario para reproducir el ${}^3\text{H}$ es el aspecto más limitante. El consumo anual de Li natural de una planta de potencia sería de 3 toneladas métricas. Las reservas mundiales de Li son, según la U.S. Geological Survey (2016), de 14 000 000 t. Los recursos totales estimados alcanzan los 40 000 000 t



5. CONCLUSIONES

Parece razonable suponer que la raíz religiosa nacida de las condiciones materiales de cada sociedad ha guiado a determinados pueblos por la senda de la anteposición de la avidez de crecimiento frente a la armonía con el medio. Este predominio ha llevado al rápido desarrollo de importantes estructuras filosóficas que han descansado en el avance técnico, pero también han situado a la parte de la humanidad que las ha protagonizado en una situación límite en la que se encuentra amenazada su propia capacidad de supervivencia. Llegados a este punto, no es de esperar que una evolución social desreglada dé lugar a valores que tiendan a resolver el problema antes de que éste se vuelva irreversible, y una política consensuada a nivel internacional y estrictamente medida debe dirigirse a fomentar estos valores y generar una legislación pertinente. Esta es la política propuesta en el informe “Nuestro futuro común” [1].

El concepto de DS entronca directamente con la tradición cultural antropocéntrica occidental. Uno de sus mayores logros es el de destacar, al elevarlos al nivel de discusión política internacional, los conceptos de solidaridad sincrónica y diacrónica. Finalmente, el DS pasa por comprender que la tierra es un sistema finito, con un aporte exterior de potencia limitado, condiciones ambas que constriñen el modelo productivo y también que la economía es la herramienta que el ser humano puede manejar para orientar la dirección (o calidad) del desarrollo. Aunque diversos agentes han querido disputar el concepto, éste queda claro en los términos en que se define en el informe, quedando sin embargo las políticas reales por ser definidas.

La Fusión Nuclear es un medio de obtención de energía que lleva investigándose para sus usos civiles los pasados 60 años en base a las promesas de sostenibilidad. Si bien es cierto que algunas de estas promesas podrían haber estado valoradas por encima de sus capacidades reales, la Fusión Nuclear es una firme candidata para contribuir a paliar problemas tan graves como el calentamiento global o las tensiones geopolíticas relacionadas con la posesión de las materias primas de la energía. Para completar el ajuste de la tecnología de fusión con los criterios del DS es preciso que los dirigentes de las naciones que desarrollan la tecnología lleguen a la convicción de que se trata de un bien perteneciente a la humanidad en su conjunto y en este sentido tomen medidas en la dirección de facilitar que sus ventajas puedan ser disfrutadas por



las mayorías desfavorecidas, colaborando de esta manera con el objetivo de disolver las diferencias de calidad de vida entre seres humanos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Brundtland, G. H. (1987). Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (Comisión Brundtland): Nuestro Futuro Común. Comisión Brundtland, New York. [Volver a página 159 161 162 163 165 166 169 170](#)
- [2] Daly, H. E. (2006). Sustainable development—definitions, principles, policies. In The future of sustainability (pp. 39-53). Springer Netherlands. [Volver a página 159](#)
- [3] Mebratu, D. (1998). Sustainability and sustainable development: historical and conceptual review. Environmental impact assessment review, 18(6), 493-520. [Volver a página 159 160 161](#)
- [4] Riechmann, J. (1995). Desarrollo sostenible: la lucha por la interpretación. De la economía a la ecología, 11-35. [Volver a página 159](#)
- [5] Gallie, W. B. (1955, January). Essentially contested concepts. In Proceedings of the Aristotelian society (Vol. 56, pp. 167-198). Aristotelian Society, Wiley. [Volver a página 159 160](#)
- [6] José Miguel Petisco (1782). Sagrada Biblia. [Volver a página 160](#)
- [7] (1972). In Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano. Estocolmo. [Volver a página 162 163](#)
- [8] Sallé Alonso, C. (2015, Marzo). El acceso universal a la electricidad y su papel en la lucha contra la pobreza. En Energía y Geoestrategia 2015, IEEE (Ministerio de defensa), ISBN: 978-84-9091-053-5. [Volver a página 165](#)
- [9] Club Español de la Energía. (2015). Estrategia energética española a medio y largo plazo: mix y mercados. Cuadernos de energía, (45), 72-86. [Volver a página 166](#)
- [10] Tim Berners, Lee, Robert Cailliau, Jean-François Groff, Bernd Pollermann, “World wide web: the information universe”, Internet Research, (2010) Vol. 20 Iss: 4, pp.461 - 471. [Volver a página 167](#)

BIBLIOGRAFIA DE FIGURAS

- [9.1] Tomada de: <http://es.unesco.org/sdgs>



GLOSARIO

Las definiciones utilizadas en el presente glosario han sido extraídas, en su mayoría, del diccionario nuclear de la Sociedad Nuclear Española.

Antineutrino

Antipartícula del neutrino. Se emite, por ejemplo, en la desintegración beta negativa.

Antipartícula

Partícula elemental que tiene masa en reposo, espín y módulo del isospín iguales a los de la partícula correspondiente, y valores opuestos de la carga, paridad y otras magnitudes características. Las antipartículas se designan anteponiendo el prefijo anti al nombre de la partícula correspondiente; así, dícese: antineutrón, antiprotón, etc. Se representan, normalmente, con el mismo símbolo de la partícula, afectado de una tilde.

Barión

Nombre genérico que se da a los fermiones que experimentan la interacción fuerte. Están formados por la unión de tres *quarks*.

Bomba termonuclear

Artefacto bélico cuyo gran poder explosivo se debe a la súbita liberación de energía como consecuencia de la fusión de determinados núcleos atómicos ligeros (hidrógeno, litio, etc.).

Bosón

Nombre genérico que se da a las partículas que cumplen la estadística de Bose-Einstein; todas estas partículas tienen espín entero o nulo.

Bremsstrahlung (radiación de frenado)

Radiación electromagnética que se emite cuando un electrón sufre una variación súbita de su velocidad por la acción del campo eléctrico de un núcleo. Por generalización, puede extenderse el concepto al caso de partículas cargadas que se mueven en los campos eléctricos de núcleos atómicos o de otras partículas cargadas.

Ciclo Rankine

Es un ciclo de potencia representativo del proceso termodinámico que tiene lugar en una central térmica de vapor. Utiliza un fluido de trabajo que alternativamente evapora y condensa, típicamente agua.

Ciclotrón

Acelerador de partículas pesadas en el que éstas se desplazan en espiral bajo la acción de un campo de guía y experimentan repetidas aceleraciones sincronizadas mediante un campo eléctrico alternativo de frecuencia constante.

Criterio de Lawson

Tratándose de una instalación de fusión por confinamiento magnético, requisito que tiene que cumplir el plasma para generar más energía que la empleada para producirlo. Para el ciclo de deuterio-tritio, este requisito se cumple cuando el producto de la densidad del plasma por el tiempo de confinamiento es mayor que $2 \cdot 10^{14} \text{ scm}^{-3}$.

Deuterio

Isótopo natural del hidrógeno, cuyo número másico es 2. Se representa por el símbolo *D*. Su núcleo, el deuterón, contiene un protón y un neutrón. Aunque su abundancia natural es muy pequeña, puede obtenerse, prácticamente puro, por técnicas de separación isotópica. Tiene una sección eficaz apreciable para la producción de fotoneutrones. Su poder de moderación es muy elevado, por lo que, combinado con el oxígeno en el agua pesada, se utiliza como moderador. El deuterio se llama también hidrógeno pesado

Electrón

Partícula elemental estable, del género de los leptones, que forma parte de los átomos y que posee una carga de electricidad negativa de valor $(1,602 \cdot 10^{-19} \pm 0,000 \cdot 07) \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Su masa en reposo es 1836,2 veces menor que la del protón. Su símbolo es *e*⁻.

Espín

Momento angular intrínseco de una partícula o sistema de partículas.

// 2. Elipsis de número cuántico de espín

Fotón

Partícula elemental perteneciente al género de los bosones, con masa en reposo y carga nula y espín unidad. Es el cuanto elemental de energía electromagnética y es responsable de la interacción electromagnética. Su antipartícula es ella misma. Su símbolo es γ .

Gluón

El gluon o gluón es el bosón portador de la interacción nuclear fuerte, una de las cuatro fuerzas fundamentales. No posee masa ni carga eléctrica, pero sí carga de color, por lo que además de transmitir la interacción fuerte también la sufre.

Ignición

Condición en que las reacciones de fusión se automantienen, sin necesidad de fuentes externas de calentamiento. En un plasma de deuterio y tritio se consigue cuando el calentamiento del plasma por las partículas alfa iguala las pérdidas de calor.

Leptón

Nombre genérico que se da a los fermiones que no experimentan la interacción fuerte. Su nombre alude a que los primeros leptones conocidos poseían una masa en reposo inferior a la del nucleón; posteriormente se han descubierto leptones pesados. Los leptones se clasifican en tres familias: el electrón y el neutrino electrónico; el muón y el neutrino muónico; el tauón y el neutrino tauónico, más las seis antipartículas correspondientes.

Mesón

Nombre genérico que se aplica a los bosones cuya masa en reposo no es nula. Son todos inestables y su número bariónico es nulo. Están formados por la unión de un quark y un antiquark.

Muón

Partícula elemental inestable, del género de los leptones, cuya masa en reposo es 206,8 veces la masa del electrón. Su carga es la del electrón y su espín $\frac{1}{2}$. Su símbolo es μ^- .

Neutrino

Partícula elemental del género de los leptones, con masa en reposo y carga nulas y espín $\frac{1}{2}$. Existen tres tipos de neutrinos, según que estén asociados al electrón, al muón o al tauón. Sus símbolos son ν_e , ν_μ y ν_τ , respectivamente.

Neutrón

Nucleón cuya carga eléctrica es nula. Su masa en reposo es 1,001 36 veces la del protón. Interviene en la constitución de los núcleos atómicos y es inestable fuera de ellos, con una vida media de 1010 ± 30 segundos, dando lugar a un protón, un electrón y un antineutrino. Su símbolo es n. Es un barión, con espín $\frac{1}{2}$, paridad positiva y extrañeza nula. Constituye el miembro del doblete nucleónico con componente Z del isospín igual a $-\frac{1}{2}$.

Nucleón

Nombre genérico que se da a las partículas constituyentes de los núcleos atómicos, es decir, al protón y al neutrón. Se considera que, en realidad, sólo existe la partícula nucleón, capaz de manifestarse en dos estados.

Partícula alfa

Núcleo de ${}^4\text{He}$ emitido en una desintegración nuclear. Por extensión, toda agrupación de dos neutrones y dos protones. Se representa por el símbolo α .

Partícula beta

Electrón, positivo o negativo, emitido en la desintegración de un núcleo atómico. Se representa por el símbolo β .

Plasma

Fluido que resulta cuando se ioniza casi totalmente un gas a temperaturas muy elevadas. Contiene iones positivos y electrones en concentración prácticamente igual, por lo que en grandes volúmenes es eléctricamente neutro y buen conductor de la electricidad.

Positrón

Antipartícula del electrón, con la misma masa y carga opuesta.

Protón

Nucleón cuya carga eléctrica es positiva e igual a la del electrón. Su masa en reposo es $(1,67252 \pm 0,00008) \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. Interviene en la constitución de todos los núcleos atómicos y constituye por sí solo el núcleo del protio. Su símbolo es p . Es un barión estable, con espín $\frac{1}{2}$, paridad positiva y extrañeza nula, y constituye el miembro del doblete nucleónico con componente Z del isospín igual a $+\frac{1}{2}$.

Quark

Según las teorías físicas desarrolladas a partir de 1964, voz inglesa, de muy difícil traducción, empleada como nombre genérico de un grupo de partículas subelementales, las cuales, junto a los leptones y a las antipartículas correspondientes, constituyen los ladrillos del universo; a semejanza de los leptones, los quarks se dividen en tres familias, con dos miembros en cada una: los quarks arriba (u) y abajo (d); los quarks encanto (c) y extraño (s); y los quarks cima (t) y fondo (b); todos ellos tienen carga eléctrica semientera, número bariónico $\frac{1}{3}$ y espín $\frac{1}{2}$. Según estas teorías los hadrones están formados por una combinación de quarks y antiquarks; los bariones son la unión de tres quarks y los mesones la unión de un quark y un antiquark.

Radiactividad

Propiedad que presentan algunos nucleídos de desintegrarse espontáneamente. // 2. En una cantidad dada en una sustancia, número medio de desintegraciones nucleares que se producen por unidad de tiempo. Su unidad es el becquerelio (Bq).

Radiación gamma

Radiación electromagnética emitida durante una desexcitación nuclear o un proceso de aniquilación de partículas. Su longitud de onda, en general, es menor que la de los rayos X, por lo que es extraordinariamente penetrante.

Radiactividad natural

Radiación ionizante existente en la naturaleza en ausencia de cualquier instalación nuclear o fuente radiactiva artificial. Se debe a la radiación cósmica y a los radionucleidos naturalmente presentes en la corteza terrestre y en la atmósfera.

Sabor

El sabor es, según el modelo estándar de la física de partículas, el número cuántico que permite distinguir a cada uno de los seis quarks: *u* (*up*), *d* (*down*), *s* (*strange*), *c* (*charm*), *b* (*bottom*) y *t* (*top*).

Tauón

Partícula elemental inestable, del género de los leptones, cuya masa en reposo es 3.720 veces mayor que la masa del electrón. Su carga es la del negatrón y su espín $\frac{1}{2}$. Su símbolo es τ .

Tomografía por emisión de positrones

Técnica de diagnóstico que se utiliza generalmente para detectar la existencia de tumores, determinar su naturaleza, detectar y localizar recurrencias sospechadas y pronosticar o valorar la respuesta a la terapia. Se basa en la administración de un fármaco marcado con un nucleido emisor de positrones y la detección de sus fotones de aniquilación. Sigla: TEP.

Tritio

Isótopo radiactivo del hidrógeno cuyo número másico es 3. Se representa por el símbolo *T*. Su núcleo contiene un protón y dos neutrones. Es un emisor puro de radiación beta débil y de período largo. Se produce en la naturaleza por acción de los rayos cósmicos y artificialmente por acción de los neutrones sobre el deuterio, el litio y el boro. Es un producto de fisión ternaria. Se emplea para marcar moléculas y como trazador y desempeña un papel importante en las reacciones termonucleares. La contaminación de la biosfera por tritio aumenta a causa de las explosiones nucleares y de la exploración de los reactores nucleares.

LISTADO DE AUTORES

Eduardo Oliva Gonzalo

Doctor en Ciencia y Tecnología Nuclear por la Universidad Politécnica de Madrid y Docteur en Physique por la École Polytechnique de París

Adriana Ortiz Gómez

Ingeniera Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid y Máster en Ciencia y Tecnología Nuclear por la misma.

Nuria Moral Fernández

Doctora en Ciencia y Tecnología Nuclear por la Universidad Politécnica de Madrid.

Alejandro Carrasco Sánchez

Graduado en Ingeniería Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid y Máster en Ingeniería Industrial por la Universidad Politécnica de Madrid y Nuclear por el INSTN de París.

José Manuel Perlado Martín

Catedrático de Física Nuclear y director del Instituto de Fusión Nuclear en la Universidad Politécnica Madrid.

Kevin Fernández-Cosials

Doctor en Ciencia y Tecnología Nuclear por la Universidad Politécnica de Madrid.

Raquel Suárez Hontoria

Ingeniera química por la universidad de Salamanca y Máster en Ciencia y Tecnología Nuclear por la Universidad Politécnica de Madrid.

Manuel Cotelo Ferreira

Doctor en Ciencia y Tecnología Nuclear por la Universidad Politécnica de Madrid.

Alfonso Barbas Espa

Doctor en Ciencia y Tecnología Nuclear por la Universidad Politécnica de Madrid.