



RASC

Real Academia
Sevillana de Ciencias

A vueltas con la fusión termonuclear

discurso pronunciado por el

Excmo. Sr. D.

Antonio Barrero Ripoll

en el acto de recepción como académico numerario
el día 16 de enero de 2007

y

contestación del académico numerario

Excmo. Sr. D.

Javier Aracil Santoja

A VUELTAS CON LA FUSIÓN TERMONUCLEAR

*Discurso pronunciado por el
Excmo. Sr. D. Antonio Barrero Ripoll,
en el Acto de su recepción como Académico Numerario
celebrado el día 16 de enero de 2007*

Excmo. Sr. Presidente de la Real Academia de Ciencias de Sevilla, Excmo. Sr. Vicerrector de Investigación de la Universidad de Sevilla, Ilmo. Sr. Director de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de La Universidad de Sevilla, Excmos. e Ilmos. Srs. Académicos, Señoras y Señores.

Para aquellos que desempeñamos labores docentes e investigadoras en Sevilla hay pocos honores comparables al de ser elegido Académico de Número de la Real Academia Sevillana de Ciencias. Al comparecer ante este docto auditorio, en el acto solemne de mi investidura como académico, es obligado expresar mi agradecimiento al Pleno de la Academia, por su benevolencia al haberme conferido tal honor. Soy consciente, no obstante, de que la distinción no puede dirigirse sólo a mí como individuo, sino que es extensivo a todos los que me han ayudado en mi trabajo investigador. Les confieso mi satisfacción al verme acogido en esta Real Corporación en la que figuran tantos ilustres y prestigiosos maestros, que son a la vez grandes amigos. Expreso también mi agradecimiento al Profesor Javier Aracil por prestarse a contestar a este discurso y por el honor que me hace al darme la bienvenida a esta docta institución.

Llegué a Sevilla en el año 1980 al ganar, por concurso oposición, la Cátedra de Mecánica de Fluidos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Dejaba atrás años muy fecundos y gratos, como fueron los que pasé en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos de la Universidad Politécnica de Madrid donde llegué a desempeñar varias plazas docentes y finalmente obtuve por oposición la plaza de Profesor Adjunto Numerario de Aerodinámica, de la que soy excedente.

En mis tiempos mozos, la Universidad española era muy distinta de la que hoy conocemos. Los medios materiales, bibliotecas y laboratorios, y las dotaciones de profesorado eran muy escasos y el nivel medio de las clases que se impartían era mediocre y, salvo excepciones, con escaso atractivo intelectual. Existían, sin embargo, figuras aisladas de gran talla científica y altura intelectual, cuya incorporación a la Universidad era reciente. Éstos en compañía de otros, que paulatinamente se irían incorporando, fueron la semilla del cambio radical que la Universidad española experimentó en los años setenta y ochenta de la pasada centuria. Refiriéndome a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos, los estudiantes de entonces tuvimos la fortuna

de contar con maestros excepcionales. Ignacio Da-Riva, ya desaparecido, fue uno de ellos. Enseñaba aerodinámica y su fascinante personalidad y magnetismo me atrajeron de tal modo que determinaron inexorablemente mi vocación hacia la investigación. Los profesores Amable Liñán, Enrique Sánchez Palencia, hoy en la Sorbona, y, más tardíamente, Juan Ramón Sanmartín completaban un excepcional plantel de científicos y docentes, capaces de impartir una sólida formación a los estudiantes además de brindarles amistad, ayuda desinteresada y consejo sobre la forma de ampliar estudios.

Justo antes de partir para la Universidad de Ann Arbor en los Estados Unidos de América, donde había conseguido plaza para hacer el doctorado gracias a la recomendación de Amable Liñán, contraí unas inoportunas fiebres tifoideas que me mantuvieron bastantes meses en el dique seco. Abortada la aventura americana, y ya recuperado, daba comienzo mi vida profesional cuando el profesor Da-Riva me invitó a colaborar en la realización de un trabajo sobre control térmico de satélites, financiado por la Agencia Espacial Europea (ESA).

Al terminar este trabajo, se me presentó la oportunidad de participar en uno de los programas que la Junta de Energía Nuclear¹ tenía encomendados por aquel entonces, entre los que figuraba la investigación y desarrollo de los sistemas de fusión nuclear. Juan Ramón Sanmartín, que había accedido recientemente a la cátedra de Física de la Escuela de Ingenieros Aeronáuticos, recibió el encargo de abordar el estudio de los aspectos fluidodinámicos de la interacción de pulsos intensos de láser con la materia y me invitó a unirme al proyecto. Acepté entusiasmado esta invitación, que ligaba mi vida profesional a la Universidad y hacía de la investigación mi actividad principal.

Les hablo de mis comienzos en el estudio de la fusión termonuclear controlada y más concretamente de la fusión por confinamiento inercial, no solo porque la investigación de su fluidodinámica haya sido el objeto de mi trabajo durante muchos años, primero en Madrid y más tarde aquí en Sevilla, sino también porque he decidido hacer de la fusión nuclear el eje central de mi discurso de ingreso. Debo confesarles que tomar esta decisión me ha llevado algún tiempo ya que mis investigaciones en el campo se interrumpieron hace ya muchos años². Soy consciente de que mi visión actual del problema de la fusión adolecerá, lógicamente, de la profundidad y la amplitud de la del especialista, pero me animo a creer que una mirada retrospectiva hacia lo que antaño constituyó mi campo de trabajo pueda resultar de interés aunque no sea más que para dar cuenta de los avances habidos. La importancia social, económica y medioambiental de la producción de energía además de su incuestionable atractivo científico técnico han sido también factores que he considerado en mi decisión.

Desconozco cual sea la razón por la que dejamos de ser activos en un determinado campo de investigación. Quizá se agoten las ideas y no seamos, en adelante, capaces de formularnos nuevos interrogantes. En otras situaciones, quizás sea la fascinación por un problema nuevo la que nos lleva irremisiblemente a enfocar sobre él toda nuestra energía intelectual. Tampoco puede descartarse la dictadura de las modas, presentes

1. Actualmente Centro de Investigaciones Energéticas, Medio Ambientales y (CIEMAT).

2. En 1989 fue el año en que publiqué mi último trabajo sobre fluido-dinámica de la interacción de haces de iones con plasma. A. Barrero, *Laser and Particle Beams*, 7,229-236, 1989.

también en la actividad científica, que convierten un campo de investigación en foco de atracción para científicos o lo pretieren sin más.

Fueran éstas u otras las razones de fondo, lo cierto es que a principios de la década de los noventa abandonaba mis estudios sobre fusión inercial para concentrarme en el electrospray y en sus aplicaciones. Manifestaciones de este fenómeno eran conocidas al menos desde 1600, cuando William Gilbert³, en su obra *De Magneto*, reportó la formación de meniscos cónicos cuando un trozo de ámbar electrificado se aproximaba suficientemente a una gota de agua. Trescientos años después, en los albores del siglo XX, Zeleny⁴ abordó de nuevo su estudio, pero su endiablada dificultad físico-matemática y la supuesta carencia de aplicaciones, lo mantuvieron arrinconado como simple curiosidad científica durante casi un siglo. Su letargo terminó cuando John Fenn revolucionó la química analítica acoplando un electrospray a un espectrómetro de masas convencional⁵. Por este trabajo, Fenn fue uno de los galardonados con el Premio Nobel de Química del año 2002.

Tuve la oportunidad de ver por primera vez el electrospray en el laboratorio de Fenn durante una de mis visitas a la Universidad de Yale en el verano de 1989. Debo confesarles que, más que sus numerosas aplicaciones, me atrajo primero la belleza con que se manifestaba el fenómeno: un cono casi perfecto de líquido, de cuyo vértice emerge un finísimo chorro que rompe finalmente en un aerosol de gotas cargadas, figura 1⁶. Desde entonces, el electrospray y la búsqueda de sus aplicaciones tecnológicas, fundamentalmente en el ámbito de la Nanotecnología, han sido el objeto principal de mi investigación. Hubiera sido lógico, por tanto, centrar este discurso en torno de lo que ha sido mi trabajo en los últimos quince años si no se diera la circunstancia de haber publicado recientemente algunos trabajos de divulgación⁷, en lengua castellana, sobre resultados de investigación obtenidos por mi grupo. Creo honestamente que el discurso resultaría inevitablemente una repetición de lo ya escrito, de modo que, por respeto a esta docta Academia, he descartado abordarlo.

Como alternativa, estuve tentado de hablarles en este discurso de los flujos con giro intenso, a cuyo estudio he dedicado una parte considerable de mi tiempo y de los que poseo cierto conocimiento. Estos flujos aparecen con frecuencia en la naturaleza y en la industria y son de gran importancia, por sus aplicaciones, en la ingeniería. Exhiben, además, comportamientos extraordinariamente singulares como, por ejemplo, la rotura de vórtices o la separación térmica. Más de medio siglo después de que estos fenómenos fueran por primera vez reportados existe aún controversia cuando se trata

3. William Gilbert, *De Magneto*, 1600.

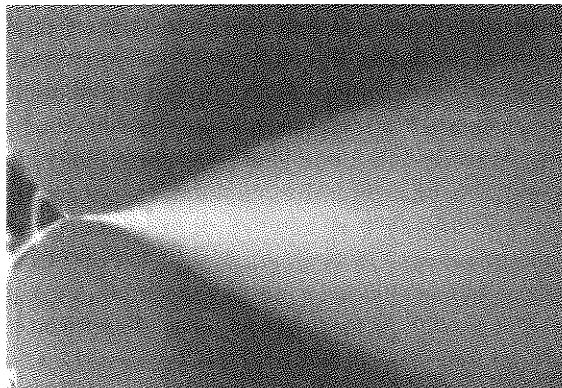
4. J. Zeleny, *Physical Review* 3, 69-91, 1914.

5. J.B. Fenn, M. Mann, C.K. Meng, S. F. Wong, *Science* **246**, 64 (1989). John Fenn compartió con Koichi Tanaka y Kurt Wüthrich el Premio Nobel de Química del año 2002.

6. C. Pantano, A. M. Gañán-Calvo y A. Barrero. *J. Aerosol Sci.* **25**, 6, 1065-1077, 1994.

7. A. Barrero. *La atomización electrohidrodinámica de líquidos y sus aplicaciones en nanotecnología*. Real Academia de Ingeniería. Discurso leído en la sesión inaugural del año académico 2004; A. Barrero, I.G. Loscertales, M. Márquez. *Microchorros y nanochorros*. Investigación y Ciencia 351, 44-51, Dic. 2005; A. Barrero. *Generación de nanopartículas de estructura compleja por medios electro-hidrodinámicos*. Premio a la Investigación Javier Abengoa Puigcerver (edición 2004). Fundación Focus-Abengoa y Universidad de Sevilla 2006.

FIGURA 1
CONO, CHORRO Y SPRAY DE METANOL



de explicar sus causas. Por su dificultad matemática, estos flujos son poco inteligibles para los no especialistas, lo que los hace poco aptos para ser tratados con el mínimo de claridad y amenidad que una ocasión como ésta requiere. A pesar de ello, hubiera intentado abordarlos en mi discurso de no ser porque los trabajos que sobre flujos giratorios hemos publicado recientemente⁸ han sido recibidos con poco interés por la comunidad científica. Confío que el tiempo venga a hacerles justicia, aunque a veces me pregunto si esta esperanza no será otra cosa que incapacidad para juzgar la propia obra. Si fuese así, me acojo a su benevolencia en la seguridad de no ser merecedor de mayor burla que la que Cervantes hacía de aquel padre al que el amor a su hijo cegaba. Decía Cervantes⁹ *“Acontece tener un padre un hijo feo y sin gracia alguna, y el amor que le tiene le pone una venda en los ojos para que no vea sus faltas, antes las juzga por discreciones y lindezas y las cuenta a sus amigos por agudezas y donaires.”* Comprenderán pues que, dadas las circunstancias que les he expuesto, descarte de mi discurso a estos interesantísimos flujos.

Les hablaré, por tanto, de la fusión termonuclear por confinamiento inercial. Del estado en que se encontraba cuando abandoné el campo y aún podía ser considerado un especialista en el mismo y del que encuentro ahora, pasados más de quince años cuando no siendo más que un diletante, me vuelvo a enfrentar con él. Las primeras investigaciones sobre fusión datan de 1951 cuando Lyman Spitzer fundó, en la Universidad de Princeton, el Laboratorio de Física de Plasmas y dirigió el primer programa de investigación en fusión termonuclear controlada como fuente de energía limpia. Desde entonces, la investigación en fusión nuclear se ha llevado a cabo principalmente en grandes laboratorios con cuantiosas dotaciones tanto de personal

8. M.A. Herrada, M. Pérez-Saborid, A. Barrero. *Phys. Fluids*, **11**, (11), 3678-3687, 1999; M. Pérez-Saborid, M.A. Herrada, A. Gómez-Barea, A. Barrero. *J. Fluid Mech.* **471**, 51-70, 2002; M.A. Herrada, A. Barrero. *Phys. Rev. E* **66**, nº 3, 36311-36320, 2002; M.A. Herrada, M. Pérez-Saborid, A. Barrero. *Phys. Fluids* **15**, nº 8, 2208-2218, 2003.

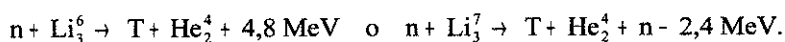
9. Miguel de Cervantes, prólogo a la primera parte del Quijote.

como de presupuesto. Sin embargo, a pesar de los esfuerzos realizados y a que tanto las propiedades básicas de un plasma magnetizado como las condiciones requeridas para liberar la energía de fusión eran bien conocidas en 1950, la realidad es que el control de la fusión termonuclear comporta la superación de dificultades tan enormes que, a pesar del mas de medio siglo empleado en su investigación, su dominio y control siguen aún desafiando las capacidades humanas. Retrospectivamente, parece claro que tanto las dificultades experimentales de los plasmas magnetizados como la ingeniería necesaria para controlar su comportamiento fueron ampliamente subestimadas en las primeras etapas de la investigación en fusión nuclear. En efecto, el plasma magnetizado ha exhibido siempre un comportamiento turbulento con ausencia de equilibrio termodinámico local de modo que la difusión de carga y energía es siempre mayor que la que correspondería al transporte por colisiones. Se puede afirmar sin error, que el progreso en la fusión ha consistido en la reducción paulatina de la turbulencia del plasma y en el aumento del tiempo de confinamiento mediante máquinas magnéticas cada vez más potentes y sofisticadas. Es de justicia reconocer aquí las contribuciones, en este campo, debidas al físico español Benjamín Carreras del laboratorio federal americano de Oak Ridge.

Dejando al margen los núcleos de las estrellas y de nuestro sol donde, debido a la gravedad, se producen espontáneamente y de forma estable reacciones de fusión, el único método conocido de obtener reacciones termonucleares a escala macroscópica consiste en calentar la materia a temperaturas suficientemente elevadas para vencer la barrera de Coulomb aprovechando la energía cinética del movimiento térmico. A tales temperaturas la materia adopta el estado de plasma o gas ionizado, donde los electrones se han separado de los núcleos y su comportamiento no difiere mucho del de una mezcla de gases como el aire, sino fuera por la tendencia del plasma a la neutralidad eléctrica y porque las masas de iones y electrones son muy dispares.

Se han conseguido reacciones termonucleares utilizando diferentes elementos ligeros (hidrógeno, deuterio, tritio, helio, etc. De entre ellas, la reacción nuclear que posee una velocidad de reacción mayor es aquella en la que los reactantes son los isótopos pesados del hidrógeno: deuterio y tritio. La velocidad de esta reacción alcanza sus valores máximos entre 100 y 1000 millones de grados Kelvin. Una inversión de energía de 10 keV por núcleo (equivalente a una temperatura de 100 millones de grados) es altamente rentable ya que la fusión de un átomo de deuterio y uno de tritio proporciona helio y un neutrón y libera 17.6 MeV en forma de energía cinética de los productos de reacción. La ganancia en la reacción es del orden de más de 800 veces la energía invertida por nucleón, de modo que la energía contenida en tales combustibles es verdaderamente asombrosa. Para facilitar la comprensión de estas enormes cantidades de energía, permítanme decirles que la fusión del deuterio contenido en un dedal de costura liberaría tanta energía como la combustión de 20 toneladas de carbón o que hay aproximadamente la misma energía en un litro de agua que en trescientos litros de gasolina. Por otra parte, la cantidad de deuterio existente en la naturaleza es prácticamente inextinguible; en el agua del mar hay un átomo de deuterio por cada 6400 de hidrógeno, de modo que la cantidad existente en los océanos

sobrepasa los siete billones de toneladas; esto es, en los mares hay energía suficiente para cubrir el consumo actual de energía en el mundo durante un tiempo equivalente al tiempo de vida que le resta al Sol; esto es, 5000 millones de años. El isótopo tritio, por el contrario, no se encuentra en la naturaleza ya que es radiactivo, con una vida media de 12,3 años, pero puede producirse fácilmente en el propio reactor, a partir del litio. Bastaría cubrir las paredes internas del reactor con una capa de litio, que existe abundantemente en la Naturaleza aunque no en forma libre debido a su alta reactividad, para obtener tritio según las reacciones



Otras reacciones de fusión distintas a la del D-T tardarán tiempo aún en ser exploradas porque sus velocidades de reacción son un orden de magnitud menor que la de aquella. Aún así, algunas de ellas han despertado considerable atención por las ventajas que comportan. Por ejemplo, la reacción deuterio-deuterio eliminaría la necesidad de regenerar el tritio, cuyo proceso, aunque suficientemente bien comprendido, complica enormemente la ingeniería del ciclo térmico para la producción final de energía eléctrica. Otra reacción de gran interés es la del deuterio y el isótopo 3 del helio cuyos productos de fusión son helio 4 y un protón. Esta reacción en la que ninguno de sus componentes es radioactivo brinda, además, la posibilidad de diseñar una máquina térmica de conversión directa de energía nuclear en eléctrica, lo que evitaría el ciclo termodinámico intermedio y por ende la refrigeración por agua y el calentamiento de la atmósfera.

A temperaturas de 100 millones de grados, el plasma debe confinarse durante el proceso de reacción para mantenerlo alejado de las paredes del reactor. Además, el tiempo de confinamiento debe ser suficiente largo para que exista ganancia energética; esto es, para que la energía liberada en la fusión compense a la empleada en calentar el plasma y a la energía perdida por éste, fundamentalmente por radiación. Como la energía resultante de la fusión es proporcional al cuadrado de la densidad y al tiempo de confinamiento y la empleada en calentar el plasma es proporcional a su densidad, para tener ganancia energética es necesario que el producto de la densidad del plasma n por el tiempo de confinamiento τ_c sea mayor que un cierto valor, que depende de la temperatura. Esta condición, que no tiene en cuenta las pérdidas por radiación, constituye el denominado criterio de Lawson¹⁰, que para valores de la temperatura del orden de diez millones de grados resulta

$$n \tau_c > 10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ s}.$$

Dos son los métodos propuestos hasta ahora para conseguir confinar el plasma: confinamiento magnético y confinamiento inercial. En el confinamiento por medio de campos magnéticos se recurre al hecho de que las partículas cargadas en un plasma

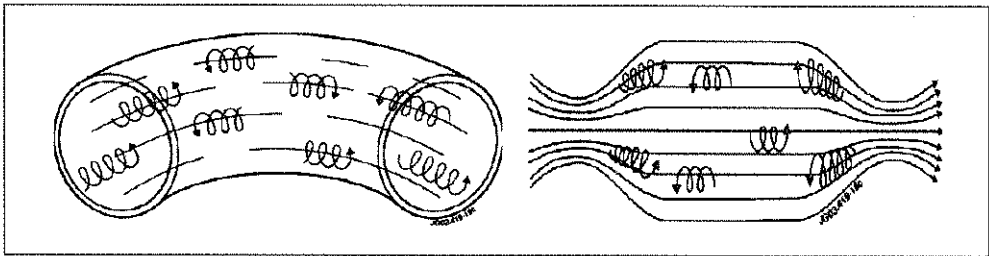
10. J.D. Lawson.. *Proc. Phys. Soc. London* **B70**, 6, 1957.

magnético en las que las líneas de campo se constriñen en los bordes y las partículas invierten sus trayectorias al llegar a ellos; véase el esquema de la figura 2.

El Tokamak, desarrollado primero en la Unión Soviética, ha jugado un papel principal en los programas de fusión de EEUU, Europa y Japón por ser el diseño que hasta ahora ha conseguido mejores resultados, de entre todos los ensayados. No obstante, para que en un reactor magnético se alcancen las condiciones necesarias para obtener energía de la fusión se requiere mantener bajo control los procesos siguientes: (1) colisiones entre partículas que perturban sus trayectorias y dan lugar a difusión de masa y energía a través de las líneas de campo, (2) pérdidas por radiación, principalmente radiación ultravioleta, emitida por los iones; y (3) inestabilidades del plasma de gran escala que distorsionan el campo magnético y pueden dar lugar a un comportamiento turbulento del plasma que conduzca a un abrupto escape de éste fuera de la vasija magnética.

Los experimentos con Tokamaks han obtenido, en los últimos tiempos, condiciones del plasma y tiempos de confinamiento muy cercanos a los requeridos para obtener

FIGURA 2
TRAYECTORIAS DE LAS PARTÍCULAS EN SISTEMAS TOROIDALES Y DE ESPEJO MAGNÉTICO

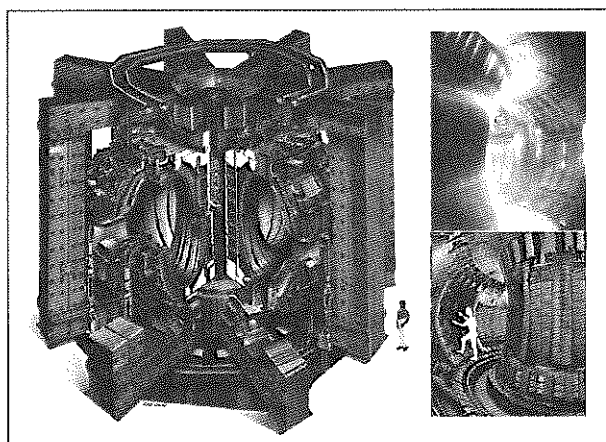


magnetizado se mueven siguiendo trayectorias espirales a lo largo de las líneas de campo, de modo que el plasma se puede confinar siempre que la presión magnética exceda a la térmica. Como la primera está limitada por los máximos valores del campo magnético que pueden conseguirse en la práctica (menores de 100 kG) y la segunda es proporcional a la densidad del plasma, se concluye que a temperaturas termonucleares sólo plasmas de densidad suficientemente baja pueden confinarse magnéticamente, típicamente menor que 10^{15} partículas por centímetro cúbico lo que equivale aproximadamente a una densidad cien millones de veces menor que la del agua. Si la densidad del plasma fuese del orden de 10^{14} partículas/cm³ y su temperatura iónica fuese del orden de 100 millones de grados Celsius, la intensidad de campo magnético necesaria para confinarlo sería del orden de 50 kG y, para satisfacer el criterio de Lawson, debería confinarse durante un tiempo mayor de 1 segundo.

Básicamente, son dos los tipos de vasija magnética propuesta para confinar un plasma: las de tipo toroidal en las que las líneas de campo magnético se cierran sobre si mismas, y cuyo representante más genuino es el denominado Tokamak, y las de espejo

energía de fusión con ganancia energética. Entre ellos destacan los resultados del Joint European Torus (JET) y del Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR) que comenzaron a operar a principios de la década de los 80 del pasado siglo y que todavía hoy permanecen operativos. Ambos han sido instrumentos de investigación útiles para demostrar que es posible la creación de un plasma suficientemente caliente y confinarlo durante un tiempo apropiado para los requerimientos de la fusión termonuclear. En particular, en los experimentos realizados en el JET, la energía obtenida en la fusión ha alcanzado ya las dos terceras partes de la consumida. La complejidad de la ingeniería de estas máquinas magnéticas, concretamente la del JET, se hace patente en las representaciones de la figura 3.

FIGURA 3
VISTA REPRESENTATIVA DEL JET. LAS DE LA DERECHA MUESTRAN LA VASIJAS TOROIDAL
CON PLASMA (LA SUPERIOR) Y SIN PLASMA (LA INFERIOR)



Estos reactores experimentales previos han jugado además un papel fundamental como preparatorio para el diseño final del International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) que se prevé como la última fase experimental antes del primer reactor de fusión con fines comerciales. El ITER es una máquina de tipo Tokamak, cofinanciada internacionalmente, que se instalará en Cadarache, Francia. Para dar una idea de la magnitud del proyecto, basta decir que para su construcción hay presupuestada una inversión cercana a los 10.000 millones de euros¹¹ y que su duración se extenderá a un periodo de treinta años, diez para su construcción y el resto para su operación. El ITER, con un radio de toro de 6.2 m, usará bobinas superconductoras para confinar el plasma de hidrógeno y producirá 500 MW de potencia en exceso sobre la consumida por la máquina, durante un tiempo de al menos 500 segundos.

11. D. Butler. *Nature* **435**, 1142–1143, 2005. Este presupuesto será con toda probabilidad ampliamente sobrepasado.

Hace más de treinta años se comenzó a explorar una vía a la fusión nuclear distinta de la magnética cuando se consideró la posibilidad de hacer fusionar una pequeña porción de plasma antes de su escape libre al vacío¹²; de ahí el nombre de fusión por confinamiento inercial. A temperaturas de 100 millones de grados Kelvin, la velocidad de escape de un plasma es del orden de 1000 km/s por lo que si su longitud característica fuese de 1mm, el tiempo disponible para la reacción nuclear del plasma sería de 1 nanosegundo (mucho menor que el tiempo de confinamiento magnético). Por tanto, para satisfacer el criterio de Lawson, la densidad del plasma debe ser mayor que 10^{23} partículas por centímetro cúbico, que supera ligeramente la densidad del DT sólido¹³. En principio, la fusión por confinamiento inercial requeriría calentar una pequeña bolita de D-T en fase sólida o líquida, de aproximadamente un milímetro de radio a temperaturas de 100 millones de grados antes de que el plasma resultante tuviera la oportunidad de expandirse.

La energía de una pequeña bola de plasma de 1 mm de radio, densidad igual a la del DT sólido y temperatura de 100 millones de grados, no es demasiado alta; es del orden de 1 MJ, que es la energía que un televisor consume durante una velada familiar. Como esta energía debe ser liberada en tiempos del orden del nanosegundo, o menores, la potencia requerida es como mínimo del orden de 1000 TW; lo asombroso de esta cifra se revela al comprobar que es 25.000 veces mayor que la potencia máxima de la red eléctrica española. El láser es el dispositivo ideal para suministrar estas potencias, ya que este dispositivo es capaz no sólo de focalizar la energía de su haz sobre áreas muy pequeñas sino de liberarla en intervalos de tiempo extraordinariamente cortos, de hasta un picosegundo y aún menores. Esquemáticamente, la fusión por confinamiento inercial consistiría en la irradiación, mediante un láser, de una bolita de D-T para calentarla rápidamente a temperaturas termonucleares e inducir una micro-explosión termonuclear, cuya energía resultante sería transformada en electricidad a través de un ciclo térmico de vapor mas o menos convencional; claramente, una fracción de la energía eléctrica producida debería usarse para recargar el láser para un nuevo disparo.

Esta descripción de la fusión por confinamiento inercial descubre completamente su ingenuidad cuando se calcula la energía del láser necesaria para producir la explosión termonuclear. En efecto, debido a las ineficiencias del proceso de transferencia de energía del láser al plasma¹⁴ y a la del ciclo térmico, la energía del pulso de láser requerida para la fusión está totalmente fuera del alcance de las prestaciones de los láseres actuales. Sin embargo, ésta energía disminuye con la densidad del plasma y se haría del orden de la de los láseres disponibles si la densidad del plasma fuese extraordinariamente elevada, del orden de mil o incluso diez mil veces la densidad del D-T sólido¹⁵.

12. J.L. Emmett, J. Nuckolls y L. Wood. *Sci. Am.* **231**, 24, June 1974.

13. Este valor de la densidad del plasma supera la densidad del D-T sólido.

14. Típicamente menor del 10%.

15. J.J. Duderstadt, G. A. Moses. *Inertial Confinement Fusion*. John Wiley & Sons. 1982.

En efecto, si v , W , k y c_s son respectivamente el volumen de plasma quemado por unidad de tiempo, la energía liberada en la reacción de fusión (17,6 MeV para la reacción de D-T), la constante de Boltzmann y la velocidad de expansión del plasma, la energía liberada en la fusión por unidad de volumen por una bola de DT de radio R y densidad n en el tiempo R/c_s es $n^2 W R/c_s$. Por otra parte, si M es la ganancia energética, o relación entre la energía obtenida en la fusión y la consumida por el láser, ϵ es la eficiencia del acoplamiento laser-plasma y β es un factor que se introduce para tener en cuenta el calentamiento del plasma debido a la propagación de la onda de quemado y a los propios productos de la reacción nuclear, el criterio de Lawson exige que $n^2 W R/c_s > (MnkT)/(\beta\epsilon)$, lo que exige un radio mínimo de la bola de plasma, $R > (MkTcs)/[\beta\epsilon nW]$, que es una forma alternativa del criterio de Lawson. La energía del láser necesaria para llevar una bolita de radio R y densidad n a condiciones de ignición termonuclear es entonces:

$$E_l \approx \frac{R^3}{\beta\epsilon} nkT \approx \frac{M^3}{\beta\epsilon} \left(\frac{kTc_s}{\beta\epsilon n_o \langle v\sigma \rangle W} \right)^3 \frac{n_o^2}{n^2} n_o kT \approx \frac{M^3}{(\beta\epsilon)^4} \frac{n_o^2}{n^2} E_{po}, \quad (1)$$

donde n_o es la densidad del D-T sólido y $E_{po} = n_o kT$, del orden de 1 MJ, es la energía de una bola de plasma de 1mm de radio densidad n_o y temperatura de 100 millones de grados Celsius. Es interesante observar que si la densidad n del plasma fuese la del DT sólido, la energía del láser, requerida para calentar el plasma, incluso para una ganancia tan modesta como 10, sería del orden de 1 GJ, lo que supera en un factor de mil las prestaciones de los actuales láseres. Sin embargo, la expresión (1) demuestra que si la compresión del plasma, n/n_o , fuera del orden de diez mil veces la densidad del DT sólido, la energía del láser requerida para la fusión, incluso con ganancias de 100, se reduciría a valores del orden de los de los láseres actuales.

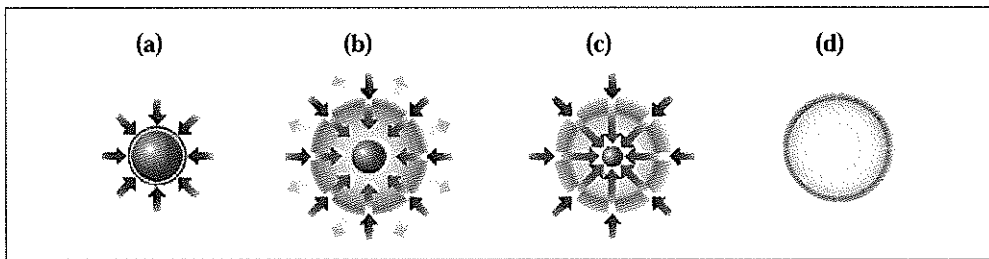
La cuestión es cómo lograr en la Tierra, sin ayuda de la gravedad, densidades de la materia que son mayores que las existentes en el núcleo de nuestro Sol y comparables a las del interior de las masivas enanas blancas. La respuesta está en el láser mismo que puede ser usado para comprimir eficientemente la materia sin calentarla. Considérese, por ejemplo, la iluminación uniforme de una pequeña bola de D-T sólido, denominada *blanco* en la jerga de la fusión inercial¹⁶, mediante diez o más haces de luz láser, con una intensidad típica del orden de 10^{14} W/cm² o mayor. Cuando la superficie del blanco absorbe esta enorme potencia por unidad de área, el material de la superficie se vaporiza e ioniza, formando una corona de plasma caliente y rarificado que se expande rápidamente en el vacío, como se esquematiza en la figura 4a. Esta violenta expansión del plasma produce una compresión de la bola, de manera análoga a la que el empuje sobre un cohete resulta de la expansión de un gas a través de su tobera de

16. La mayoría de los estudios experimentales y teóricos más tempranos consideraban la implosión de simples blancos de D-T tanto en fase sólida como líquida. Sin embargo, la compresión isentrópica del D-T requiere su encapsulado mediante finas multicapas de materiales diferentes. J.J. Duderstadt, G. A. Moses. Op. cit.

salida, figura 4b. Las ondas de compresión, que viajan hacia el centro de la cápsula, comprimen el DT de modo que en un pequeño núcleo central se consiguen densidades muy altas y temperaturas termonucleares y las reacciones de fusión se inician, figura 4c. Las partículas alfa resultantes de las reacciones de fusión se absorben en esta región extraordinariamente densa, calentándola a temperaturas aún más elevadas, lo que da lugar a un quemado mucho más rápido del combustible; la onda de quemado, que se propaga hacia el exterior, hace fusionar al resto del DT antes de que éste se expanda, figura 4d. La energía liberada en estas micro explosiones nucleares sería típicamente del orden de 100 MJ y su repetición en un reactor a un ritmo de 30 veces por segundo suministraría una potencia térmica del orden de 3GW y eléctrica de 1 GW¹⁷.

FIGURA 4

a) FORMACIÓN DE LA CORONA DE PLASMA; b) COMPRESIÓN DEL DT; c) IGNICIÓN DE LA ZONA CENTRAL DURANTE LAS ÚLTIMAS ETAPAS DEL PULSO DE LÁSER; d) EXPLOSIÓN TERMONUCLEAR QUE DA LUGAR A UNA ONDA DE QUEMADO QUE SE PROPAGA HACIA EL EXTERIOR, CALENTANDO EL RESTO DE DT Y HACIÉNDOLO FUSIONAR



La irradiación del blanco mediante haces de partículas (iones ligeros o pesados) ha sido también considerada como alternativa al láser¹⁸. Haces de iones ligeros con energías en el rango de varios MeV, como protones o iones de litio o carbono, se generan en aceleradores de iones pulsados. Además de su modesto coste, su interés estriba en que la transferencia de su energía al blanco es mucho más eficaz que en el caso del láser. Desafortunadamente, las densidades de potencia requeridas en la fusión por confinamiento inercial son inalcanzables hoy día por los haces de iones ligeros. Se ha logrado acelerar iones pesados (plomo, xenon o uranio) hasta energías del orden de 10 GeV con la ventaja de que pueden ser fácilmente enfocados debido a que su alta inercia es capaz de vencer a la repulsión de los iones cargados. Además, el proceso de transferencia de su energía al blanco es muy eficiente. En contraste con los haces de iones ligeros, el excesivo tamaño y coste de los aceleradores de iones pesados han limitado considerablemente la realización de experimentos. Además, la tecnología de los haces de iones no se ha desarrollado suficientemente todavía como para permitir

17. L.A. Booath, D.A. Freiwald, T.G. Frank and T.P. Finch. *Proc. IEEE*, **64**, 1460, 1976.

18. G. Cooperstein et al. NRL Light Ion Beam Research for Inertial Confinement Fusion. NRL Memo Report 4387, Nov. 1980. R.C. Arnold, Heavy Ion Beam Inertial Confinement Fusion. *Nature* **276**, 19, 1978.

el establecimiento de un programa experimental de investigación como el que se viene realizando en la fusión por láser. No obstante, debido a sus potencialidades, no se descarta que los haces de iones puedan ser un día el sistema preferido para inducir la fusión inercial por confinamiento inercial.

Como se ha señalado anteriormente, la clave para disminuir la energía del láser es comprimir el D-T, de forma que se alcancen densidades y temperaturas lo suficientemente elevadas como para iniciar reacciones de fusión en un pequeño núcleo central del D-T, pero manteniendo frío el resto del combustible, que a esas densidades tan elevadas se comporta como un gas degenerado cuánticamente con temperatura dada por la energía de Fermi; la compresión del D-T debe ser, por tanto, lo más isentrópica posible. La presión de ablación, o presión que el violento escape del plasma ejerce sobre la superficie de ablación, comprime al D-T por medio de ondas de compresión que viajan hacia el interior del blanco con la velocidad del sonido del medio. Las ondas de compresión presentan la propiedad de que al cabo de un cierto tiempo colapsan en un frente de onda, denominado onda de choque¹⁹, que se propaga con velocidad supersónica respecto al medio. La onda de choque se forma debido a que la velocidad de una onda de compresión es proporcional a la densidad del medio en que se propaga y, por tanto, en un tren de ondas cada onda viaja con velocidad mayor que la que le precede, por propagarse aquella en un medio previamente comprimido por ésta. En un proceso de compresión a través de ondas simples, la entropía del proceso permanece constante, indicando que el proceso de compresión ocurre sin degradación de energía y la densidad del material crece indefinidamente si la presión aplicada también lo hace. Por el contrario, en la compresión a través de una onda de choque sólo parte de la energía del proceso se invierte en comprimir el medio que atraviesa la onda; el resto se invierte en calentarlo a través de procesos difusivos (viscosidad y conducción de calor) que son responsables del aumento de energía interna y de entropía que experimenta el medio al atravesar la onda de choque, de modo que la máxima densidad que puede conseguirse es limitada. En geometrías esféricas se podrían conseguir compresiones isentrópicas si la presión que se aplica sobre la superficie esférica variase con el tiempo de forma tal que generase un tren de ondas de compresión de intensidades crecientes y velocidades de propagación tales que no se alcanzasen unas a otras antes de llegar al centro de la bola.

En el proceso de irradiación del blanco con luz láser, hay una superficie bien definida, denominada de ablación, que separa el D-T frío de la corona de plasma caliente y rarificado procedente de la ablación del D-T. La absorción de la luz de láser en la corona de plasma está caracterizada por el perfil radial de densidad que gobierna los diferentes modos de absorción. En efecto, en la corona de plasma caliente hay una superficie, denominada crítica, en la que la frecuencia electrónica del plasma, ω_{ep}^{20} , que depende de su densidad electrónica, iguala a la frecuencia del láser. La luz láser se

19. Las ondas de choque viajan con velocidades supersónicas respecto al medio en que se propagan; su existencia fue anunciada teóricamente por Riemann, en su tesis doctoral en 1860.

20. $\omega_{ep} = e(n/eom)^{1/2}$; e y me son respectivamente la carga y masa del electrón.

refleja antes de alcanzar la superficie crítica y una fracción pequeña de la luz incidente y reflejada se absorbe por colisiones electrón-ion en un proceso inverso a la radiación de frenado²¹ (este proceso es tanto más ineficaz cuanto mayor es la temperatura del plasma). Existen, sin embargo, otros mecanismos de interacción láser-plasma, basados, en general, en la excitación de ondas en el plasma por la luz incidente; estas ondas pueden calentar el plasma o apantallar la luz incidente. La mayor parte de la energía del láser es absorbida en la superficie crítica mediante un proceso denominado absorción resonante, en el que el campo eléctrico incidente excita ondas longitudinales Langmuir que calientan el plasma por amortiguamiento de Landau.

Aunque el fenómeno de absorción resonante²² es básicamente lineal, hay efectos no lineales que cobran importancia cuando la intensidad de la luz del láser es suficientemente alta; un ejemplo es la producción de electrones de alta energía (supratérmicos) que es altamente indeseable en fusión por confinamiento inercial ya que, debido a que su camino libre medio es grande, pueden atravesar la superficie de ablación y precalentar el D-T degradando su proceso de compresión. En la práctica, su producción se puede reducir con una óptica de láser de mayor ancho de banda.

La luz de láser puede excitar también modos electrostáticos del plasma, tales como ondas electrónicas del plasma y ondas acústicas, en una forma tal que las inestabiliza, dando lugar a turbulencia. Su efecto, que tiende a aumentar el coeficiente de absorción, es en general pequeño porque se produce en una capa delgada de plasma en torno a la densidad crítica. La luz de láser puede también excitar ondas electromagnéticas en el plasma subdenso, conocidos como apantallamientos Brillouin y Raman²³, que dan lugar a un aumento del coeficiente de reflexión de la luz. Estos dos procesos paramétricos, especialmente el apantallamiento Brillouin²⁴, son bastante indeseables porque pueden apantallar la luz del láser, y reflejarla en forma de sendas ondas electromagnéticas del plasma (Raman y Brillouin), antes de que pueda alcanzar la superficie crítica donde es mayoritariamente absorbida. La filamentación del rayo láser y el auto-enfocado del mismo pueden también presentarse debido a perturbaciones del plasma en las direcciones paralela y perpendicular a la dirección de propagación de la luz. El proceso es inestable porque cualquier aumento local en la absorción de luz, que disminuye la densidad por mayor presión de radiación, hace acudir más luz a esa zona debido a la refracción ya que la constante dieléctrica del plasma aumenta al disminuir su densidad. Debido a que tienden a disminuir la simetría de la compresión, estos efectos deben ser radicalmente minimizados si no suprimidos.

La energía del láser se absorbe principalmente en la superficie crítica, que está tanto más alejada de la superficie de ablación cuanto menor es la frecuencia de la luz láser

19. Las ondas de choque viajan con velocidades supersónicas respecto al medio en que se propagan; su existencia fue anunciada teóricamente por Riemann, en su tesis doctoral en 1860.

20. $\omega_{ep} = e(n/\epsilon_0 m)1/2$; e y m son respectivamente la carga y masa del electrón.

21. En este tipo de absorción un fotón es absorbido por un electrón en presencia de un ion.

22. J. Perlman and J.J. Thompson. *Appl. Phys. Lett.* **32**, 703, 1978.

23. D.W. Forslund, J.M. Kindel & E.L. Lindman. *Plasma. Phys. Fluids* **18**, 1002, 1975.

24. El rango de densidades del plasma para el que apantallamiento Brillouin puede presentarse es mayor que el del efecto Raman.

y viaja hacia la superficie de ablación por conducción térmica electrónica²⁵; este flujo de energía es, naturalmente, el responsable de la violenta ablación del material y de la denominada presión de ablación que el material que escapa ejerce sobre la superficie de ablación. Debe mencionarse que el proceso es poco eficaz ya que la energía se absorbe relativamente lejos de la superficie de ablación y debe viajar hasta ella mediante procesos difusivos. La hidrodinámica de la interacción láser-plasma juega un papel fundamental en este proceso de transferencia energética ya que, por una parte, debe dar lugar a una variación con el tiempo de la presión de ablación que comprima el D-T lo más isentrópicamente posible y, por otra, debe mantener la simetría del proceso tanto como sea posible, suprimiendo las posibles asimetrías de la presión de ablación o retrasando eficazmente su crecimiento; sin estos requisitos la compresión del D-T frío hasta las altas densidades requeridas se vería abortada.

Por si los procesos involucrados en la fusión por confinamiento inercial, considerados hasta aquí, no fuesen ya de por sí extremadamente complejos, para su dominio tecnológico hay que vencer la dificultad adicional de la inestabilidad del proceso de compresión. En efecto, durante el proceso de compresión del D-T, las perturbaciones sembradas por las varias fuentes de no uniformidad existentes (rugosidad de la superficie del blanco e iluminación) pueden crecer debido a inestabilidades hidrodinámicas²⁶. En particular, la inestabilidad denominada de Rayleigh-Taylor se presenta cuando un fluido denso es acelerado por uno más ligero, de modo que para minimizar la energía potencial el fluido más pesado tiende a intercambiar su posición con el más ligero. Esta inestabilidad aparece en una situación, mucho más familiar para nosotros, en la que un fluido es soportado por otro más ligero en presencia de la gravedad; como sabemos la interfase entre los dos fluidos es inestable y ambos intercambian sus posiciones. Análogamente, la inestabilidad de Rayleigh-Taylor puede presentarse en fusión por confinamiento inercial cuando la corona de plasma de baja densidad acelera la superficie de ablación o bien, durante los últimos instantes de la implosión en los que el material que empuja y el menos denso D-T experimentan una fuerte desaceleración. El caso más inestable suele ser el de frenado como lo demuestran numerosos experimentos en los que se pueden observar chorros del material exterior fluyendo en el interior del DT y degradando la compresión y la posible ignición.

Aunque la investigación en fusión inercial se concentró pronto en los grandes laboratorios, algunos grupos universitarios mantuvieron su actividad investigadora en el campo. Permítanme referirme ahora a algunos de los resultados obtenidos por el grupo de la Escuela de Ingenieros Aeronáuticos bajo la dirección del Profesor Sanmartín. Este grupo inició, en 1975, el estudio de la fluidodinámica del plasma resultante de la irradiación de un blanco por un pulso láser recurriendo a la utilización de modelos analíticos que, aunque simplificados, permitieran entender algunos aspectos de la compleja física de la interacción láser-plasma puestos de manifiesto por los experimentos.

25. El flujo difusivo de calor no sigue, como es usual, la ley de Fourier ya que el calor es transportado por electrones de alta energía que le confieren un carácter no local.

26 J. D. Lindl, *Inertial Confinement Fusion*. Springer, New York, 1998. S.E. Bodner, D. G. Colombant, J. H. Gardner *et al.*, Phys. Plasmas 5, 1901, 1998.

En aquel tiempo ésta era la única forma de hacer investigación competitiva ya que las capacidades computacionales del país, no digamos las experimentales, eran muy limitadas; incluso hoy día, un programa experimental en fusión inercial es inabordable para una nación como la nuestra.

Se comenzó analizando geometrías planas, unidireccionales, en las que un semi-espacio de materia, limitando inicialmente con el vacío, se irradiaba uniformemente con un pulso de láser. Se encontró que para pulsos de láser lineales con el tiempo, el sistema de ecuaciones en derivadas parciales que gobierna el movimiento cuasi-neutro del plasma, incluyendo conducción térmica y viscosidad de iones y electrones, intercambio energético entre ambas especies y limitador de flujo térmico electrónico, eran de semejanza y daban lugar a un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, fuertemente no lineales, cuya resolución era mucho más abordable. Se encontró que la fluido-dinámica dependía de un parámetro adimensional que incluye los parámetros básicos del pulso de láser (intensidad máxima y duración del pulso) y del plasma y se resolvieron los regímenes asintóticos para valores grandes y pequeños de este parámetro²⁷. Una descripción analítica de la interacción de pulsos de muy alta energía (láseres y haces de iones) con la materia fue realizada en Sevilla con la colaboración de Antonio Fernández, Luis Rosety, Miguel Pérez-Saborid y Ángel Velázquez²⁸.

La labor realizada por el grupo de la Escuela de Ingenieros Aeronáuticos de Madrid ha sido verdaderamente sobresaliente. A ellos se deben los primeros modelos analíticos de fenómenos tales como: la influencia de la presión de radiación del láser sobre el perfil de densidades²⁹, el auto-enfocado de la luz de láser debido a perturbaciones perpendiculares o paralelas a la dirección de propagación³⁰, la realización, en colaboración con el Institute für Quantenoptik del Max Planck Institute, de uno de los dos códigos numéricos usados en Europa para simular todo el proceso de la interacción láser plasma y la compresión del blanco³¹, o el estudio de la inestabilidad de Rayleigh-Taylor de la superficie de ablación, cuyo análisis definitivo se debe a Javier Sanz³².

Hacia finales de los 90 impresionaba comprobar el trabajo realizado en las instalaciones experimentales existentes que operaban con láseres de neodimio y de dióxido de carbono con energías en el rango de las decenas de TW³³. Compresiones de hasta 100 veces la densidad del D-T líquido habían sido logradas con un láser de neodimio. Por otra parte, el desarrollo de instrumentación avanzada para la medida de

27. A. Barrero, J.R. Sanmartín. *The Physics of Fluids* **20**, 1155-1163, 1977. J.R. Sanmartín, A. Barrero. *The Physics of Fluids*, **21**, 1957-1966, 1978. J.R. Sanmartín, A. Barrero. *The Physics of Fluids* **21**, 1967-1971, 1978. A. Barrero, J. R. Sanmartín. *Plasma Physics* **22**, 617- 626, 1980.

27. J. Perlman and J.J. Thompson. *Appl. Phys. Lett.* **32**, 703, 1978.

28. J. Sanz, A. Velázquez, L. Roseti., A. Barrero, *Plasma Phys. and Contr. Fusion*, **27**, 329-338, 1985; A. Fernández y A. Barrero, *Plasma Phys. and Contr. Fusion*, **28**, 989-1007, 1986; A. Barrero y A. Fernández, *Plasma Phys. and Contr. Fusion* **29**, 1605-1613, 1987; A. Velázquez y A. Barrero, *Plasma Phys. and Contr. Fusion*, **30**, 311-326, 1988.

29. J.R. Sanmartín y J.L. Montañes. *The Physics of Fluids* **23**, 2413-2416, 1980.

30. J. Sanz, J.A. Nicolás, J.R. Sanmartín, J. Hilario. *Phys. Fluids* **31**, 2320-2326. 1987..

31. R. Ramis, R. Schmalz, J. Meyer ter Vehn. *Computer Physics Communications* **49**, 475-505, 1988.

32. J. Sanz. *Phys. Rev. Lett.* **73**, 2700-2703, 1994.

33. *Physics through the 1990s. Plasmas and Fluids*. National Academic Press. 1986.

características de los plasmas ha permitido comprobar la adecuación entre experimentos y las predicciones de las simulaciones numéricas. La interacción láser-plasma ha sido experimentalmente caracterizada sobre un amplio rango de intensidades y longitudes de onda que demuestran que la absorción más eficiente se tiene para láseres de longitud de onda menor de 1 μm . Algunos resultados experimentales han conseguido velocidades de la superficie de ablación y del D-T de hasta 100 km/s con niveles de no uniformidad del 5%, siendo la temperatura del D-T al final de la implosión de 4 millones de grados y su densidad del orden de cientos de veces la densidad del D-T líquido; estas compresiones son todavía menores, por un factor de diez, de las necesarias para un reactor de fusión inercial.

Para minimizar los efectos de la inestabilidad de Rayleigh Taylor, se propuso, hacia finales de la década de los 70 del pasado siglo, una propuesta alternativa denominada iluminación indirecta del blanco o *hohlraum*. En este caso, la energía del haz (láser o haces de iones) incide no sobre el blanco sino sobre un material de alto número atómico³⁴ que forra las paredes internas de una cavidad como las dos indicadas en la figura. El blanco, situado en el interior de la cavidad es irradiado por los rayos X que emite el material de alto número atómico³⁵. La eficiencia del proceso de transferencia de energía al blanco es menor en este método que en el de iluminación directa, debido fundamentalmente al proceso de conversión en rayos X. No obstante, esta desventaja no es tanta en la práctica ya que el mecanismo de conducción térmica electrónica que transporta la energía desde la superficie crítica a la de ablación para producir la implosión es muy ineficiente. En cualquier caso la nueva técnica posee indudables ventajas desde el punto de vista de la estabilidad ya que la iluminación directa, por ser menos uniforme que la indirecta, es más proclive al crecimiento de las perturbaciones por inestabilidades hidrodinámicas. Por otra parte, los dispositivos ópticos que se suelen usar para mitigar las inestabilidades hidrodinámicas en la iluminación directa³⁶ anulan prácticamente la ventaja en la eficiencia del acoplamiento láser-plasma. Finalmente, para amplificaciones tolerables de las inestabilidades hidrodinámicas, las simulaciones numéricas indican que aunque las condiciones umbrales para la ignición sean iguales en ambos métodos, la ganancia es doble en el caso de iluminación indirecta.

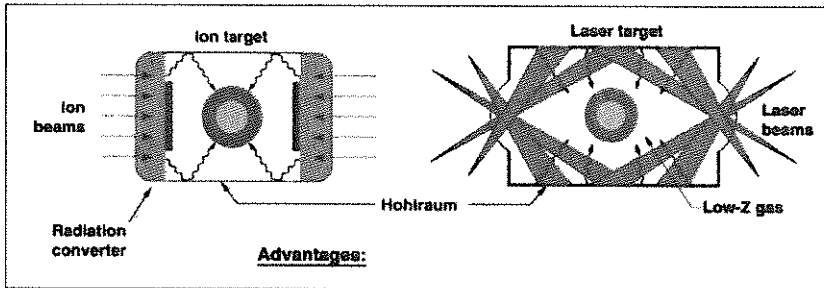
Debido a que los requisitos en la calidad de la iluminación son considerablemente menores en la iluminación directa y a que el tiempo de amplificación de la inestabilidad de Rayleigh-Taylor es también mucho menor, la geometría del láser NOVA en el Laboratorio Nacional de Lawrence Livermore (LLNL, California, EUA) fue diseñada para iluminación indirecta. Ha sido en esta instalación experimental donde se han realizado los principales experimentos de fusión por iluminación indirecta desde su puesta en funcionamiento en 1985 hasta su cierre en 1999. A través de sus 10 haces, NOVA, con una longitud de onda de 0.35 μm , era capaz de suministrar una energía de 30 a 40 kJ en un nanosegundo y una amplia variedad en la dependencia

34. En NOVA se usó oro, aunque otros materiales como wolframio y uranio se han usado también.

35. J.D. Lindl, *Phys. Plasmas* **2**, 3933, 1995. J. D. Lindl et al. *Phys. Plasmas* **11**, 339-491, 2004.

36. S.E. Bodner et al. *Phys. Plasmas* **5**, 1901, 1998.

FIGURA 5
ESQUEMAS DE ILUMINACIÓN INDIRECTA CON HACES DE IONES (IZQUIERDA)
Y LÁSER (DERECHA)



temporal del haz. Estos experimentos han permitido progresar espectacularmente en el entendimiento de cómo generar fusión y han servido de base para escalar y diseñar dos nuevas instalaciones experimentales, actualmente en construcción, con el objetivo prioritario de conseguir ignición y ganancia energética mediante fusión inercial. Se trata del *National Ignition Facility*³⁷ (NIF) que será instalado en el Lawrence Livermore National Laboratory de California, Estados Unidos de América) y del *Laser Mega Joule*³⁸ (LMJ), que será construido por el Commissariat à l'Energie Atomique cerca de Burdeos, Francia. Si todo sale conforme a lo previsto, NIF y LMJ serán las primeras instalaciones en demostrar la viabilidad de la fusión por confinamiento inercial en la próxima década. Se ha propuesto para estas instalaciones la iluminación indirecta, aunque se podrá cambiar la geometría de los haces para realizar experimentos tanto de iluminación directa o experimentar también la nueva estrategia para conseguir fusión inercial denominada de ignición rápida.

Al contrario que en las estrategias de iluminación directa e indirecta que usan un láser de gran energía para comprimir y, simultáneamente, llevar el combustible a temperaturas termonucleares, en la nueva propuesta conocida como ignición rápida del DT se utilizan dos láseres de menor capacidad energética: uno, el principal, para precomprimir el DT y el otro para llevar una parte de él a condiciones de ignición, siendo pues necesaria una simetría de la iluminación mucho menor que en la ignición central. La idea es antigua³⁹, pero sólo recientemente, con el advenimiento de los láseres de pulso corto (picosegundos), ha podido ser estudiada experimentalmente. La propuesta inicial de ignición rápida⁴⁰ consistía en taladrar un canal de propagación en la corona del blanco mediante un pulso láser, del orden de 10^{18} W/cm² seguido de otro más intenso, 10^{20} W/cm², para generar electrones relativistas de unos pocos MeV, justo en la interfase del combustible precomprimido, véase figura. Estos electrones depositan su energía en el DT creando una zona caliente donde comenzarían las reacciones

37. J.D. Lindl *Op. cit.*

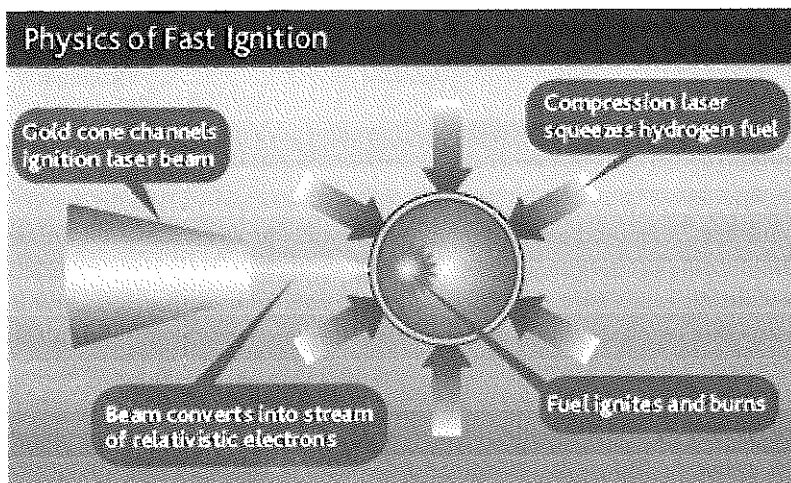
38. C. Cavailler, *Plasma Phys. and Control. Fusion* **47**, B389, 2005.

39. A. Caruso, A. y R. Gratton. *Plasma Physics* **10**, 867, 1969.

40. M. Tabak et al. *Physics of Plasmas* **1**, 1626, 1994.

de fusión. De acuerdo con estimaciones realizadas⁴¹, para producir la ignición del DT son necesarios pulsos láser de unas decenas de kJ de energía y unas decenas de picosegundos de duración.

FIGURA 6
ESQUEMA DE DISPOSITIVO DE FUSIÓN RÁPIDA



Metafóricamente, la diferencia entre la implosión convencional y la ignición rápida es parecida a la que existe entre un motor diesel y uno convencional de gasolina: en el motor diesel, el pistón comprime la mezcla aire-combustible hasta presiones y temperaturas suficientes para producir la combustión espontáneamente mientras que en el motor de gasolina, el pistón comprime la mezcla pero la combustión se inicia mediante una chispa. Esta división del trabajo permite relajar los requisitos para obtener fusión por confinamiento inercial tanto sobre la energía del láser como sobre la uniformidad de la compresión. Al menos sobre el papel, en fusión nuclear dos láseres valdrían, si la propuesta tuviese éxito, más que uno.

Los blancos de ignición rápida que se consideran más prometedores en la actualidad consisten en una cápsula esférica con una capa de material plástico conteniendo D-T criogénico en su interior y un cono adosado de material pesado, típicamente oro, con un ángulo de apertura de 30° a 60°, véase figura⁴². El láser principal, cuyo pulso es de nanosegundos, incide sobre la cápsula esférica y comprime el D-T en modo de baja entropía. Cuando se alcanza la máxima densidad del D-T, se lanza el pulso láser de muy alta intensidad 10^{20} W/cm² y duración extraordinariamente corta, femtosegundos, a través del cono. La interacción del láser con las paredes del cono genera un chorro

41. S. Atzeni. *Physics of Plasmas* **6**, 3316, 1999.

42. M. Schirber. *Science* **310**, 1610, 2005.

de electrones relativistas en el vértice que calienta parte del deuterio precomprimido y lo hace fusionar⁴³.

Tengo la impresión que los experimentos sobre ignición rápida realizados recientemente en Japón⁴⁴ (Institute of Laser Engineering, Osaka) y en el Reino Unido⁴⁵ (Rutherford Appleton Laboratory, Oxford) han logrado vencer el escepticismo que existía inicialmente sobre esta nueva estrategia para la obtención de energía de fusión. El objetivo básico de estos experimentos era, y es, la demostración de la factibilidad de la ignición rápida de blancos de fusión. Estos proyectos, con un coste mucho menor que los de NIF y LMJ, pretenden obtener energía de fusión con alta ganancia mediante láseres de mucha menor energía que los de aquellos, típicamente 200 kJ para comprimir y 70 kJ para producir la ignición. Estas nuevas instalaciones experimentales pretenden ser el paso intermedio entre las instalaciones NIF/LMJ y los futuros reactores de producción de energía. No obstante, son muchas las incertidumbres que presenta esta nueva estrategia hacia la fusión y es, por tanto, considerable la investigación necesaria que hay que realizar para despejarlas.

Como en tantos otros campos, los descubrimientos y los logros de la física y de la ingeniería de plasmas habidos durante los últimos cincuenta años han desprovisto de su carácter utópico al viejo sueño de contar con una fuente de energía medioambientalmente limpia, segura y prácticamente inextinguible. La intensa investigación en fusión termonuclear realizada a lo largo de las últimas décadas y la cooperación internacional habida han permitido definir una serie de proyectos internacionales y nacionales que serán sin duda las últimas etapas del camino hacia la obtención de reactores de fusión. Destaca entre ellos el ITER, probablemente la empresa científico-técnica más ambiciosa que la humanidad haya nunca intentado, con el objetivo de superar el último obstáculo para lograr la primera planta de potencia termonuclear. En cualquier caso, teniendo en cuenta los plazos de construcción y operación de ITER no parece probable que se pueda disponer de un reactor termonuclear comercial antes de 25 a 30 años.

Aunque en una fase más retrasada, la fusión por confinamiento inercial parece entrar en una fase decisiva para evaluar las diferentes propuestas existentes (iluminación directa, indirecta, ignición rápida). En efecto, los diseños tecnológicos de las nuevas instalaciones experimentales van a permitir chequear, sin ambigüedad alguna, las posibilidades de la fusión por confinamiento inercial como base de los futuros reactores termonucleares comerciales. A diferencia de la investigación en fusión por confinamiento magnético que está completamente enfocada a la consecución de una fuente de energía segura, medioambientalmente limpia y prácticamente inextinguible, la de fusión inercial encuentra también aplicaciones en la industria armamentística por lo que la sociedad debería ser apropiadamente informada sobre que fracción del presupuesto se dedica a investigaciones que como la que nos ocupa pueden desviarse hacia aplicaciones no pacíficas.

43. R. Kodama et al. *Nature* **412**, 798, 2001. R. Kodama et al. *Nature* **418**, 933, 2002.

44. K. Mima. *Fusion Science and Technology* **47**, 662, 2005.

45. M. Schirber. *Op. cit.*

Sólo resta hacer votos porque el logro de la energía termonuclear controlada contribuya a una mejora sustancial del bienestar humano, pero no sólo de aquellos que hemos sido ya favorecidos por los avances espectaculares de la electrónica y el microchip, el transporte, y el progreso en biomedicina, biología molecular y tantas otras disciplinas, sino también para aquellos otros, habitantes de países y continentes menos desarrollados, a los que nuestra riqueza y bienestar no ha llegado aún y que se ven abocados a sucumbir o forzados a emigrar de sus lugares de origen en condiciones harto dramáticas.

Muchas gracias.

DISCURSO PRONUNCIADO POR EL EXCMO. SR. D. JAVIER ARACIL SANTOJA

*Académico Numerario,
en contestación al leído por el
Excmo. Sr. D. Antonio Barrero Ripoll
en el Acto de su recepción como Académico Numerario
celebrado el día 16 de enero de 2007.*

Excmo. Sr. Presidente de la Academia, Ilmo. Sr. Director de la Escuela, Excmos. e Ilmos. Señores Académicos, Señoras y señores.

Cuando nuestro Presidente me comunicó su decisión facultativa de encomendarme la contestación al discurso del nuevo Académico, el profesor Antonio Barrero Ripoll, en el Acto público de su recepción en nuestra Academia, me asignó una grata tarea que me honra y me llena de satisfacción, y que le agradezco profundamente. Porque llevar la voz de la Academia en este Acto y actuar de introductor del nuevo Académico es una preciada distinción para cualquiera que haya compartido con él labores profesionales, o simple trato amistoso, y resulta enormemente estimulante y gratificadora.

Como es preceptivo haré una breve presentación del nuevo Académico bien conocido, sin ninguna duda, por los asistentes a este Acto. Pero antes quiero referirme a cómo se produjo su venida a Sevilla hace más de cinco lustros. Nos remontamos a principios de los 80 cuando esta Escuela, que hoy nos acoge circunstancialmente y que entonces tenía otro emplazamiento, empezaba a recoger los frutos de los radicales cambios que se habían producido el decenio anterior en su estructura y en su organización (como, por otra parte, se estaba produciendo en el resto de las Escuelas de ingenieros de nuestro país, así como en otros centros de enseñanza superior) y que determinaron, en nuestro caso, entre otras cosas, la incorporación a su plantilla, gracias al riguroso procedimiento de selección entonces imperante, cuando los demoledores vientos endogámicos no habían alcanzado la virulencia actual, de un selecto grupo de profesores. Así se pudo proceder a la profunda renovación del profesorado de la Escuela lo que ha contribuido decisivamente a que tenga el prestigio que ostenta. Hermosos tiempos aquellos, hoy ya en el recuerdo, en los que esta Escuela recibió un impulso decisivo para su ulterior madurez. Entre los que proporcionaron ese impulso ocupa un lugar prominente el profesor Antonio Barrero, quien desde 1980 es Catedrático Numerario de Mecánica de fluidos en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla.

Todavía recuerdo la expectación con la que se vivía entonces en la Escuela cada nueva oposición a cubrir plaza de Catedrático y las expectativas que rodeaban a los potenciales candidatos. Para Mecánica de fluidos parecía indudable que el elegido sería un discípulo muy destacado de los profesores Ignacio da Riva y Amable Liñán, grandes maestros de la ingeniería aeronáutica. Y así fue en efecto, por lo que tras unas brillantes oposiciones se desplazó a Sevilla desde Madrid, cosa que, por otra parte, puede parecer insólita en la actualidad.

De este modo se produjo la incorporación del profesor Barrero al cuadro de profesores de la Escuela. Vino rodeado de acrisolada fama de brillantez intelectual, en la que se aunaban su sólida formación científica, su asentada cultura, su infatigable capacidad de trabajo y la solidez y rectitud de sus planteamientos. Llegó dotado asimismo de una insaciable curiosidad, esa pulsión, posiblemente de naturaleza semejante a la del hambre o a la del sexo, que nos lleva a pretender entender como son y están hechas las cosas, hacer explícito su funcionamiento, y procurar ser capaces de predecir su comportamiento para ajustarlo a nuestros propósitos. Es una cualidad que está en las más genuinas raíces del rico, complejo y apasionante mundo de la ciencia, y que el profesor Barrero posee en grado sumo.

Pero, volviendo a lo que anunciaba antes, conviene hacer un rápido esbozo de su biografía. Obtuvo el título de ingeniero aeronáutico por la Universidad Politécnica de Madrid, en 1972, y el de doctor ingeniero aeronáutico por la misma Universidad, en 1977. Fue Profesor Adjunto Interino de Aerodinámica en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Aeronáuticos, de la Politécnica madrileña, a partir de 1975 y Profesor Adjunto Numerario de Aerodinámica desde 1979. De 1972 a 1979 fue Profesor de Mecánica de fluidos y de Aerodinámica en el ICAI y en la Escuela Superior de Ingenieros de Armas Navales. En 1980, como ya hemos recordado, se traslada a Sevilla para ocupar su recién obtenida cátedra. Durante el decenio siguiente se dedica a crear y consolidar un acreditado grupo de investigación cuyos frutos se iban a revelar esplendorosamente con posterioridad, como veremos luego. También hace de su asignatura, la Mecánica de fluidos, uno de los hitos de referencia en la Escuela. A continuación, a principios de los 90, efectúa varias estancias en Estados Unidos, primero como Profesor visitante en la Universidad de Yale (1990-1992) y después en la Universidad de California San Diego (1994, 1995 y 1997) donde ha impartido cursos de Aerodinámica y de Mecánica de fluidos. En estas estancias cosechó frutos variados y, como muestra, en 1994 fue distinguido con el *Annual Teaching Award of the UCSD School of Engineering*.

Su labor propiamente universitaria, en sus vertientes de investigación y de docencia, se ha complementado con otras de lo que se conoce como gestión de la investigación. Y así, ha sido Coordinador del Área de Proyectos Industriales en la Agencia Nacional de Evaluación y Prospectiva (1989-1993) y Presidente de las Ponencias de Tecnologías de la Información y Comunicaciones y Tecnologías Mecánica y Textil del Programa de Promoción General del Conocimiento de la Dirección General de Investigación Científica y Técnica (1991-1996). También ha sido Vocal del Comité Asesor de Ingeniería y Arquitectura de la Comisión Nacional de Evaluación de la Actividad Investigadora en 1994 y Presidente del Comité en 1995 y 1996.

Es Académico Fundador y de Número de la Real Academia de Ingeniería de España, desde 1995. Miembro del *Scientific Council del International Center for Mechanical Sciences* desde 1990 hasta 2005. Miembro del *Life and Physical Sciences Advisory Committee* de la Agencia Espacial Europea de 2000 a 2004. Asimismo, se le ha otorgado el Premio de *Investigación Javier Benjumea* en el año 2004, en su segunda convocatoria.

Vayamos ahora a su encomiable labor de investigación, que se reúne en más de ciento cincuenta trabajos en revistas y congresos internacionales, y en dos libros sobre mecánica de fluidos. En el campo de la fusión por confinamiento inercial, de la que nos ha hablado en su Discurso, ha investigado sobre la interacción de pulsos de muy alta intensidad (láseres y haces iónicos) con la materia. Por otra parte, ha trabajado para la Agencia Espacial Europea en control térmico de satélites. En los últimos quince años el grupo que dirige ha investigado, en hidrodinámica, sobre flujos con giro intenso: rotura de vórtices; empleo de flujos con giro intenso para acondicionamiento de aire (efecto Ranque-Hilsch); y autorrotación de masas fluidas. Pero los resultados más brillantes los ha logrado en atomización fina de líquidos por medios mecánicos y electrohidrodinámicos (*electrospray*). Así, ha explorado, en colaboración con el grupo de la Universidad de Málaga que lidera su discípulo el profesor Ignacio González Loscertales, la física y las aplicaciones ingenieriles del *electrospray* y ha contribuido a determinar sus leyes de escala. En esta línea de investigación ha descubierto y puesto a punto una nueva técnica profundamente innovadora para crear cápsulas microscópicas a partir de la rotura de chorros coaxiales electrificados de líquidos inmiscibles generados mediante campos eléctricos, que ha merecido el reconocimiento de ser acogida en las páginas de *Science*¹. La técnica se aplica con éxito a la encapsulación (con dimensiones micro y nanoscópicas) de sustancias de interés en el campo alimentario y farmacéutico.

Recientemente ha puesto a punto un método de una sola etapa para la producción de nanopartículas con estructura *core-shell* (nanoesferas huecas, nanofibras coaxiales y nanotubos). Este trabajo, publicado en el *Journal of the American Chemical Society*, ha sido incluido por la revista *Chemical and Engineering News* entre los cincuenta más relevantes del año 2004. Uno de los últimos experimentos de su grupo ocupa una portada de la revista *Advanced Functional Material*².

En paralelo con estos trabajos, en el año 2000 la Universidad de Sevilla licencia a dos compañías americanas un procedimiento de atomización de líquidos por medios exclusivamente mecánicos que atomiza aerosoles de gotas de tamaño micro y nanométrico, del cual el profesor Barrero es co-inventor. Poco después, en el año 2001, junto con colaboradores de las Universidades de Sevilla y Málaga, presenta una solicitud de patente de un método de atomización de líquidos. La patente en cuestión se registró a nombre de esas dos Universidades, en la proporción dos tercios a un tercio, firmándose un acuerdo de cotitularidad entre ambas instituciones para regular la participación de cada una en la invención. La venta de la familia de patentes

1. *Science* **295**, 5560, 1695-1698, 2002.

2. *Advanced Functional Material*, vol. 16, Dic. 2006.

desarrolladas alcanzó una cifra considerable. Pero entre caballeros no es de buen tono hablar en público de esas cosas. Sólo añadiré que en su día fue la patente más valorada económicamente de las producidas en la Universidad de Sevilla y que representó un punto de inflexión en ese capítulo.

Estos trabajos se complementan en 2001 con la promoción de una iniciativa empresarial, la creación de una *spin-off* 'YFLOW Sistemas y Desarrollos SL' para la explotación de estas invenciones, y que es una de las primeras empresas de base tecnológica de la Universidad de Sevilla. YFLOW posee una tecnología propia para la síntesis de nanopartículas en una única etapa, lo que le confiere una enorme ventaja competitiva frente a otros métodos de síntesis existentes en la actualidad. De este modo se tienen aplicaciones al encapsulado de saborizantes, aditivos alimentarios e incluso productos farmacéuticos; a catalizadores de pegamentos y adhesivos; a nanofibras cerámicas huecas para soporte de catalizadores empleados en pilas de combustible, entre otras muchas aplicaciones innovadoras.

Resumiendo lo anterior hay que decir que el profesor Barrero tiene registradas cinco patentes en el campo de la atomización fina de líquidos por medios mecánicos y electrohidrodinámicos, de las cuales tres están extendidas internacionalmente: dos de ellas en EEUU, Canadá, Europa y Japón. Estas patentes se están explotando por compañías americanas y por la propia empresa creada al efecto, la ya mencionada YFLOW que cuenta entre sus clientes a empresas internacionales (Philip Morris, Kraft Food, Henkel-Loktite, y ChemSolutions) y nacionales (Hewlet Packard España, Ramen, y Laboratorios Andrés Pentaluba).

De este modo, ha sabido combinar la carrera académica con la empresarial, con éxitos notables también en este ámbito. YFLOW fue seleccionada como empresa Atlante por la Agencia de Innovación y Desarrollo de la Junta de Andalucía por sus altos estándares de innovación ligados a una visión de mercado que le ha permitido establecer, como hemos visto, acuerdos de colaboración con multinacionales estadounidenses y europeas de primera línea. En breve inaugurará su nueva sede en el Parque Tecnológico de Andalucía de Málaga.

El discurso que acaba de pronunciar, sin embargo, no ha tratado estos temas, razón por la cual he tenido que extenderme más de lo que acaso fuese procedente. Están muy recientes intervenciones públicas suyas en nuestra ciudad en las que se ha referido con minuciosidad a estas cuestiones, por lo que ha juzgado más apropiado dedicar su intervención hoy aquí a un tema en el que trabajó en edades más tempranas de su biografía profesional. Es un trabajo sumamente interesante puesto que no sólo responde a su actividad investigadora durante un destacado período de su vida, sino que en él se ponen también de manifiesto las sutiles demarcaciones entre la actividad científica convencional y la que es más propia del ingeniero. El estudio de las propiedades de la materia en estado de plasma es claramente un problema de naturaleza científica, pues pretende conocer cómo se comporta algo que se da en la naturaleza en determinadas condiciones: el plasma. Pero el reconducir ese conocimiento y hacer germinar de él procedimientos que permitan la generación controlada de energía; el concebir procesos que emulen, hasta cierto punto, la combustión nuclear de las estrellas para aportar una

fuelle prácticamente inagotable de energía es otra cuestión, en la que la ingeniería es dominante. Es notable, como nos ha hecho ver el profesor Barrero, que el primer problema, que corresponde al dominio de las ciencias físicas, se hallaba planteado y posiblemente correctamente enfocado y resuelto desde los años cincuenta del siglo pasado, mientras que el segundo es todavía una cuestión abierta, cuya solución podría permitir que el problema energético atenuase sus caracteres dramáticos actuales.

En la obra del nuevo Académico se hacen patentes los dos momentos en los que el ingeniero recurre a la ciencia. Primero, cuando indaga las propiedades de los elementos que entrarán a formar parte de aquello que está concibiendo. Estas propiedades puede que hayan sido averiguadas, al menos en principio, por el dominio de la ciencia al que pertenecen estos elementos y por tanto, el ingeniero, recurre a esos conocimientos, cuando están disponibles. Pero si no es así él mismo se convierte en científico e investiga esas propiedades que requiere para alcanzar la síntesis que constituye el objeto de su trabajo. Esta síntesis, sin embargo, no deriva directamente de esos conocimientos, sino que es el resultado de la acción creativa e imaginativa que constituye la esencia del cometido del ingeniero. En este sentido conviene resaltar que en las obras de ingeniería realmente geniales, que han determinado un cambio radical en el curso de la civilización (la imprenta, la máquina de vapor, la aviación, la telegrafía sin hilos, por citar unas pocas) no todo lo necesario para esa elaboración estaba disponible en el conocimiento teórico utilizable cuando se concibieron esos artefactos. Fue necesario un destello de genio para alcanzar la conjunción deseada; de modo que por un momento la ingeniería parece abandonar a la ciencia y convertirse en arte: da rienda suelta a la imaginación. Se deja llevar por la libertad, esa ilusión necesaria,

Una forma de amor, la libertad.

ha dejado escrito Joan Margarit³. Pero una vez realizada la síntesis se produce el segundo momento en el que el ingeniero recurre a la ciencia: una vez concebido el ingenio, vuelve a encasquetarse el gorro de científico y aplica al resultado de su inventiva los más estrictos y rigurosos procedimientos de análisis y contrastación. Estos momentos están representados de forma eminente en la obra del nuevo Académico, en la que se conjugan armoniosamente ciencia, en el sentido convencional con que se emplea este término cuando se alude a las ciencias de la naturaleza, con ingeniería, con la creación intencional de ingenios de los que la naturaleza no nos ha dotado espontáneamente, sino que han requerido la intervención mediadora del ingenio humano para alcanzar el ser.

El profesor Barrero es, por tanto, un modelo para los jóvenes estudiantes de ingeniería, un ejemplo de ingeniero investigador y de hábil explotador de los resultados de su propia investigación. Hemos recordado cómo sus dotes singulares le han llevado a alcanzar considerables logros en su carrera científica, al tiempo que no ha desdeñado embarcarse en la transferencia del conocimiento así generado para la resolución de

3. Joan Margarit, *El primer frío*, Visor, 2004. p. 397.

problemas en el mundo industrial. Su obra ilustra ejemplarmente el complejo de requerimientos científicos al que se somete el ejercicio de la ingeniería, que incluye el más aquilatado rigor tanto en el proyecto, como en la construcción y ensayo de los productos que genera; y todo ello sin desdeñar los insoslayables problemas de aceptación social del producto, sometidos estos últimos a determinantes e ineludibles condicionamientos económicos y empresariales.

Ya es tiempo de acabar con esta respuesta y de proceder a dar la más cálida bienvenida al profesor Antonio Barrero Ripoll en esta institución, al tiempo de felicitarnos todos sus miembros por su incorporación a ella. No es aventurado postular que la entrada del nuevo Académico reportará beneficios a todos los afectados. A él, que se enriquecerá con la amplitud de perspectivas científicas aquí representadas y a nosotros porque nos traerá su profundo impulso renovador, su rica personalidad, y sus creativos y estimulantes puntos de vista. Nos esperan a todos fructíferos beneficios de esa relación. Viene al caso invocar lo que dijo Andrenio, en *El Criticón*⁴, ante la perspectiva de descubrir, ver, gozar y admirar el plausible teatro del también moldeable, apostilláramos nosotros, universo:

Aguarda, que aquí es menester tomar aliento para relación tan gustosa y peregrina.

Pues eso.

Muchas gracias.

4. *El Criticón de Baltasar Gracián*, Clásicos Españoles, Opera Mundi, 1999. p. 85.