

LA ENERGÍA "H" Y LOS CAPRICHOS DEL PLASMA

por PIERRE DE LATIL

Trad. sintetizada por Benjamín J. C. Subercaseaux

Si en los fenómenos de "fisión", valga decir, de desintegración atómica, los núcleos atómicos liberan energía, esto se debe a que se necesita menos energía para asegurar la cohesión de dos átomos medianos que aquella de uno muy grande e inestable, como es el Uranio 235.

Los fenómenos de "fusión" son inversos: aquí hay liberación de energía, porque si dos átomos livianos se unen para formar uno menos liviano, éste tendrá una masa menor a la suma de las masas de sus progenitores. Todas estas reflexiones resultan banales desde el 1º de noviembre de 1952, en que la primera bomba "H" confirmó como realidad tal disipación de energía. Al igual que la bomba A, de fisión explosiva, mostró el dominio de esa energía que controlamos en las pilas atómicas, también la fusión explosiva podríamos dominarla sin necesidad de usar un combustible tan caro como es el U-235, sino muy barato y abundante, como es el hidrógeno pesado o Deuterio, que se encuentra a razón de un gramo por cada 54 litros de agua de mar.

Desgraciadamente, esta meta es harto difícil de conseguir, dados los problemas que se presentan. Una reacción de fisión del U-235, es un fenómeno que se desencadena espontáneamente gracias a los neutrones libres que se encuentran en todas partes, y luego se desarrolla "en cadena". En cambio, la fusión de átomos livianos exige condiciones extremadamente difíciles de conseguir y que no existen sobre el planeta. Los átomos de Deuterio (constituídos por un protón y un neutrón) no dan aquí, por efecto de su choque, un átomo de Helio (dos protones y dos neutrones), ya que esta reacción requeriría temperaturas del orden de aquellas que existen en el interior del Sol.

Para combinar el Carbono con el Oxígeno del aire hay que iniciar la reacción mediante una llama; después de esto la reacción se desarrolla por sí misma, ya que el calor liberado por las primeras combustiones desencadena las siguientes. Este sería el ejemplo de una reacción en cadena. De esta misma forma, es necesario un "fósforo" para desencadenar una reacción de fusión, pero un fósforo que debiera ser nada menos que un trozo de sol. Después no habría problema para que la reacción siguiera autoalimentándose.

Es la búsqueda de este "fósforo" la que, como se comprende, presenta tantos obstáculos. Se necesita conseguir temperaturas de varios millones de grados en un

receptáculo que contiene átomos de Deuterio. Sin embargo, no basta obtener tales temperaturas, sino que hay que mantenerlas durante algún tiempo; al igual que un fósforo sobre un papel para que éste se inflame. Es el problema que presenta más quebraderos de cabezas a los físicos.

En 1956, en el Centro Atómico de Harwell, en Londres, el físico Igor Kourchatov, miembro de la Academia de Ciencias de la URSS, declaró que un gran paso habría sido dado en el laboratorio del prof. Artzimovich hacia el dominio del proceso termonuclear: se consiguió una temperatura de varios millones de grados dentro de un tubo que contenía una mezcla de Deuterio y Tritio a muy baja presión, en medio de la cual se desarrolla un arco eléctrico de formidable intensidad.

En el gas los átomos se disocian en núcleos positivos y electrones negativos, transformándose el gas en Plasma. Con esto se consigue lo que Kourchatov llamó una "mecha de tejido solar". En efecto, el arco eléctrico determina un campo magnético que reúne las partículas del Plasma que conducen la corriente. Desgraciadamente, tal contracción es pasajera y muy rápida; luego de algunas pulsaciones el Plasma se apaga.

Se necesitan altas temperaturas para realizar fusiones, y se comprende, pues se trata de unir núcleos cuyas cargas positivas tienden a rechazarse. Las partículas deben sufrir colisiones de muy alta energía, de tal manera que puedan vencer las formidables barreras de potencial y penetrar los núcleos.

Existe una profunda contradicción en la estructura atómica que la física no logra aún explicar satisfactoriamente. En su interior, ya no es válida la ley universal de repulsión de cargas eléctricas de igual signo, sino que allí los protones demuestran una formidable cohesión. Existe, por lo tanto, un cierto límite dentro del núcleo en el cual las fuerzas de Coulomb o de repulsión dan paso a aquellas nucleares de atracción.

Un medio para conseguir una fusión sería utilizar un acelerador que lance protones contra otros a gran velocidad. Aquello es factible y ya fue realizado en 1932 por Cockcroft y Walton, con el antepasado de los aceleradores: un aparato construido especialmente para este experimento. Es así cómo hicieron pasar protones a través de un escudo eléctrico de núcleos de Litio, fabricando núcleos de Helio. Sin embargo, con este método sólo se consiguen colisiones, y, por lo tanto, fusio-

nes, aisladas, o cuando más en muy pequeño número como para que la energía liberada sea capaz de iniciar una reacción en cadena.

La noción de energía cinética (íntimamente relacionada con la velocidad de las partículas) expresada en electrón-volt, debe dar paso a la noción de temperatura, ya que lo que llamamos temperatura no es otra cosa que la expresión estadística de la energía cinética media de las partículas de un sistema. Para expresar energía cinética en temperatura, aceptemos que un electrón-volt corresponda a 10.000 grados centígrados. Las partículas liberadas por un acelerador a 10.000 e.v. tienen la misma energía que aquellas de un Plasma a cien millones de grados; sólo que en este último es el conjunto de partículas el que alcanza en promedio esta energía; en cambio, las partículas de un acelerador son poco numerosas.

Para conseguir suficientes fusiones como para que se desate un fenómeno en cadena, necesitamos altas temperaturas. Sin embargo, no existe un límite en el cual se pueda decir que a esa temperatura es penetrado un núcleo. Debido a que una partícula es también una onda —y aquí nos encontramos en los dominios de la mecánica ondulatoria—, cualquiera que sea su energía, posee una probabilidad no nula de penetrar un núcleo. Si bien es cierto que mientras más energía posee una partícula, mayores serán las probabilidades de alcanzar su objetivo. Y he aquí que descubrimos que sólo podemos plantear nuestro problema en términos de probabilidades.

Ahora bien, la probabilidad que más nos interesa es aquella a partir de la cual las chances de fusión sean lo suficientemente grandes para que la energía de esas reacciones pueda mantener fusiones en cadena. Se admite que para la fusión de dos átomos de Deuterio ésta se sitúa hacia los 30.000 e.v., lo que representa 300 millones de grados centígrados. Para la reacción Deuterio-Tritio, esta energía sería de sólo 4.000 e.v., es decir, 40 millones de grados centígrados; pero es incómodo conseguir Tritio, y es así como las experiencias actuales se llevan a cabo solamente con Deuterio. Cuando se consiga una temperatura adecuada y durante el tiempo indispensable, será el momento de emplear el Tritio.

A tales temperaturas todos los problemas están resueltos. En primer lugar, la materia se encontrará en un nuevo estado, el plasma. Las energías puestas en juego aquí serán mayores que aquellas de unión entre electrones y núcleo. El átomo se verá disociado (ionizado) en una mezcla de grandes núcleos positivos y pequeños electrones negativos; las partículas componentes estarán eléctricamente cargadas y estas cargas cohabitarán en el plasma.

Este plasma a altas temperaturas es aún poco conocido. Para hacernos una idea de los nuevos problemas creados, pensemos que ya no se puede hablar de sólo "una" temperatura. En general, existen dos temperaturas: una para los protones y otra para los electrones. Sólo al haber una densidad apropiada de protones y electrones, el choque de éstos entre sí hace que ambas temperaturas se igualen.

El hecho de que los elementos del plasma estén cargados permite que a tan altas temperaturas puedan ser contenidos, dadas sus propiedades eléctricas, en un receptáculo inmaterial constituido por campos magnéticos (las llamadas "botellas magnéticas" de Edward Teller). Gracias a este artificio, las partículas pueden ser mantenidas juntas, lo que en otras circunstancias parecería imposible.

Esquemizando un protocolo, tendríamos que: en un receptáculo de vidrio o metal sería introducido un gas enrarecido. Después, en el interior del recipiente se organizarían campos magnéticos que impidan al gas a altas temperaturas, es decir, al plasma tocar las paredes.

Cuando partículas electrizadas son sometidas a un campo magnético, éstas se disponen enrollándose en torno de las líneas de fuerza. Esto ocurre a las negativas o a las positivas, y la única diferencia en su comportamiento será el sentido de su enrollamiento espiralado, el que dependerá del signo de sus respectivas cargas.

El "paso" de esta espiral será tanto más pequeño cuanto mayor sea la intensidad de campo que soporte esa partícula o lo que es lo mismo, cuanto más cercanas estén las líneas de fuerza unas de otras.

Finalmente, el paso de las espiras se anulará y luego se tornará negativo. Lo que dicho de otra manera: la trayectoria en espiral retrocederá a partir del punto en donde la partícula encontrará una cierta intensidad de campo. El conjunto de estos puntos de retorno constituye un "espejo magnético". Es así cómo se verá efectuar a las partículas infinitas idas y venidas en sus trayectorias en espiral a lo largo de las líneas de fuerza. Con esto habremos logrado "confinar" el plasma (este mecanismo es el que rige en las zonas de la alta atmósfera, situadas a algunos miles de kilómetros de la tierra y que conocemos como "cinturones de Van Allen". Estas zonas presentan una gran densidad de partículas componentes de un gran plasma, que se enrollan alrededor de las líneas de fuerza del campo magnético terrestre y que como su intensidad de campo es mayor en los polos, hace que este plasma se encuentre allí confinado).

Kourchatov proporcionó una solución aparente para el problema que supone el alcanzar las altas temperaturas necesarias para una reacción de fusión: lanzar a través del Deuterio enrarecido descargas eléctricas de

gran intensidad (se refirió a la totalidad de la corriente proporcionada por una de las mayores centrales de Dnieper). En Occidente, las experiencias se hicieron de noche, empalmando al tubo de Deuterio toda la corriente que sería capaz de alimentar una capital. Esta corriente determina un calentamiento por efecto Joule. Otro medio es aquél de un calentamiento por inducción gracias a corrientes de muy alta frecuencia, inducida en una bobina que rodea al tubo.

Otro medio aun, hoy en día considerado como de capital importancia, es comprimir el plasma bruscamente, intensificando los campos magnéticos de la botella. Es de hacer notar que con estos medios sólo se persigue alcanzar fantásticas temperaturas por solo ínfimas fracciones de segundo necesarias para iniciar una reacción de fusiones en cadena.

Planteado de esta manera el problema, nos aparece menos inalcanzables; sin embargo, sería necio pensar que se logre este objetivo sin grandes dificultades.

Esas trabas serían: en primer lugar, que el plasma muestra una gran inestabilidad. Siempre, luego de algunas diez milésimas de segundo, escapa fuera del campo magnético.

Esta característica es particularmente notoria en las experiencias al estilo Kourchatov o "tubo Zeta", en donde el plasma —la "mecha de tejido solar"— está confinado dentro de un campo magnético nacido de la misma descarga que le proporciona el calor. El efecto de pulso, el "pinch effect", es muy transitorio. El plasma pulsa varias veces, luego escapa al confinamiento y toca las paredes vaporizando la materia. Aun si el tubo resiste, basta una pequeña proporción de partículas energéticas que escapen del campo y vengán a chocar contra las paredes para arrancar de aquí átomos extranjeros que "contaminarán" el plasma enfriándolo.

En efecto, las partículas "frías" de las paredes chocan con aquellas calientes y absorben su energía. Ahora bien, ocurre que la totalidad del plasma, incluidos los electrones, debe estar a la temperatura necesaria. De lo contrario, con la disipación de energía de los choques, ésta sería insuficiente para desatar las primeras reacciones de fusiones en cadena. Por lo tanto, las condiciones del experimento son las de conseguir una muy alta temperatura dentro de un plasma confinado.

Otra dificultad reside en que el espejo magnético no es jamás totalmente impermeable: existe siempre para las partículas una probabilidad de franquear la invisible barrera. Sin embargo, si se logra conseguir campos de bastante intensidad, la proporción de pérdida determinada por aquella causa podría ser limitada.

Más grave aún es el hecho de que, habiendo gran densidad de partículas confinadas pudieran éstas crear corrientes locales, las que al actuar conjuntamente

producirían campos magnéticos y eléctricos que se sumen y lleguen a vencer el campo de confinamiento. Por lo demás, toda botella magnética presenta un punto débil, que lo podríamos comparar al gollete y que se encontraría en los extremos del cinturón de confinamiento, allí donde las líneas de fuerza se hacen paralelas y por donde las partículas pueden escapar.

Resumiendo, los problemas con que nos topamos son: la inestabilidad del plasma, la necesidad de conseguir temperaturas muy altas en todo el plasma confinado y la dificultad de mantener durante un tiempo mínimo un confinamiento perfecto.

En la actualidad, los caminos de investigación originales han sido abandonados totalmente, ya que está visto que sólo se obtendrán algunos millones de grados al lanzar fantásticas intensidades de corriente a través del plasma y esa temperatura no sería aún suficiente para la fusión.

Si el plasma se calienta a la manera antigua, mediante una corriente eléctrica que lo atraviesa, esto ocurre por efecto Joule; puesto que como sabemos, el paso de una corriente por un conductor determina la emisión de una cantidad de valor proporcional a la resistencia del conductor y al cuadrado de la intensidad ($Q = I^2 R$). Por lo tanto, aumentando la intensidad se aumenta en mucho el calor producido. Desgraciadamente, a partir del millón de grados la resistencia tiende a disminuir y aun a anularse. De tal manera, que a temperaturas de algunos cientos de millones de grados podríamos decir que la materia prácticamente no posee resistencia eléctrica y se encuentra en un estado bastante similar de supraconductividad al que reina en las cercanías del cero absoluto. Ahora bien, si la resistencia desaparece, no hay posibilidad de conseguir calentamiento ($Q = I^2 \times 0 = 0$).

Otra razón que hizo abandonar la técnica de las descargas eléctricas fue que el confinamiento producido por la misma corriente que origina el campo, no dura más allá de una ínfima fracción de segundo. La inestabilidad de esta configuración de plasma, se debe a que cuando una partícula se escapa, mientras más se aleja del campo, menos puede éste actuar sobre ella para traerla nuevamente a su lugar de origen. Se necesitaría, para devolverla a su cuna magnética, una fuerza de campo tanto más poderosa cuanto mayor sea su alejamiento. Descubrimos aquí, por lo tanto, un desequilibrio verdaderamente fundamental. Nos encontramos ante la definición misma de desequilibrio: si un objeto en desequilibrio comienza a caer, lo hará cada vez más rápido; es lo que le ocurre a una piedra inestable sobre la ladera de una montaña.

Se comprende, pues, que actualmente los dispositivos tiendan a orientarse en el sentido de crear campos magnéticos de una configuración tal que posea tanta

más energía para llamar al orden una partícula, cuanto más ésta haya desarrollado su tentativa de fuga.

En Los Alamos se llevan a cabo en la actualidad importantes investigaciones estadounidenses sobre la fusión, y estos trabajos son conocidos bajo el nombre de "Sherwood Project". El gran físico James L. Tuck, uno de los directores del conjunto del programa de los EE. UU. y a cargo de Los Alamos, propuso una configuración de campo magnético que bautizó con el nombre de "Piquet fence" (empalizada de estacas). Este término está tan bien imaginado que hace innecesarias muchas explicaciones: series de bobinas desarrollando sus respectivos campos magnéticos constituirán un círculo que cerrándose sobre sí mismo confinará al plasma. Tuck emplea aun para calificar esta geometría, el término de "caulked" (calafateada).

En tal configuración, la botella magnética ya no posee un solo "gollete" sino varios y muy estrechos. Aquí, cuando una partícula se aleja del redil, encuentra un "perro" que la trae de regreso; la ferocidad del perro es mayor mientras más desarrollada está la fuga. Hemos conseguido con esto un equilibrio estable. El sistema está tan bien calafateado que ahora se nos presenta el problema de cómo introducir el plasma en este receptáculo tan hermético. Esto se logra inyectándolo a gran velocidad mediante un "cañón de plasma" que introduce sus tiros a través de puntos débiles de la barrera, entre dos "estacas".

En Los Alamos, basándose en este principio, fueron construidas cuatro máquinas: Picket fence I, 2-A, 2-B y actualmente 3, que entrará luego a funcionar y en la que reposan grandes esperanzas.

En Fontenay-aux-Roses, Francia, y siempre en la búsqueda de una configuración estable, P. H. Rebut, un teórico, demostró por cálculos la posibilidad de encerrar un plasma entre un campo axial y uno longitudinal que se desarrollen en un mismo recinto. Sin entrar en el detalle de este dispositivo, bautizado MEST (Machine pour L'Etude de la Striction Tubulaire), sólo podemos decir que ya se ha logrado probar experimentalmente y en pequeña escala esta teoría y que una máquina mayor está actualmente en construcción. Vimos anteriormente que existen dos medios para obtener las energías cinéticas necesarias en la fusión de átomos: o bien un acelerador o si no altas temperaturas. Actualmente, las investigaciones están orientadas en el sentido de combinar ambos procedimientos. De tal manera, que las partículas irían ya con una gran energía al recinto de confinamiento. Sin embargo, tenemos que el acelerador envía muy pocas partículas cada vez, lo que se soluciona si pensamos que al enlazarlas en forma continua a un lugar en donde serían almacenadas, podría alcanzarse con esto grandes densidades.

Siguiendo este razonamiento, se construyó el D. C. X. (1957) en el laboratorio de Oak Ridge (Tennessee). El principio es algo complejo: una corriente de partículas es inyectada a 600.000 e. v. (equivalente a 6.000.000.000 °C). Y estas partículas son iones moleculares de Deuterio.

Las moléculas de Deuterio están formadas de dos átomos; si uno de estos átomos pierde su electrón, tenemos un ion molecular (formado por un átomo y un núcleo de Deuterio). Estos iones altamente energéticos, son introducidos en un recinto en donde existe un campo magnético axial, en el eje del cual se desarrolla un arco eléctrico intenso. Describen en este campo una trayectoria en círculo cerrado que retorna a su origen. Pero antes la molécula es disociada por el arco eléctrico en un átomo y un núcleo de Deuterio.

Este núcleo tiene sólo la mitad de la masa de su molécula, pero sin embargo posee la misma energía. Debido a esta disminución de su masa, describe un círculo mucho más pequeño y queda, por lo tanto, cautivo dentro del campo. Con esto logramos confinar núcleos muy energéticos que gracias al flujo continuo se van acumulando hasta conseguir una densidad apropiada.

Basada en este principio, en la URSS se construyó la célebre máquina OGRA, y en Francia los físicos europeos de Fontenay realizan actualmente la MMH (Machine Miroir à Injection d'Ions). Este último proyecto nos parece de sumo interés, si tenemos en cuenta que la OX estadounidense inyecta iones por un solo orificio, en cambio aquí se introducirán por una hendidura que rodea totalmente la máquina. Así se logra proyectar iones de todas direcciones convergiendo en el centro de confinamiento.

También en Fontenay-aux-Roses se trabaja en el Dispositivo Experimental de Compresión Adiabática (DECA). Una botella magnética de trabajo clásico en donde son inyectadas las partículas hasta alcanzar una densidad apreciable; en este momento entra a funcionar un nuevo campo magnético que actúa comprimiendo este plasma aún más y transformándolo en uno muy denso y caliente.

En la actualidad, sería aún muy optimista esperar que se logre una reacción en cadena de fusión autoalimentada indefinidamente; lo que en realidad se persigue por el momento es producir ínfimas explosiones H que se extinguirán por sí solas, dada su inestabilidad, pero que proporcionarán mayor energía que la utilizada para producirlos. Entonces, esta energía será transformada en electricidad y aprovechada por la Humanidad.