

CONFERENCIAS CÉLEBRES

Continuamos esta sección de la revista, dedicada a Conferencias célebres impartidas en la Universidad Autónoma de Madrid a lo largo de su historia, bien como Lecciones inaugurales de curso académico, o bien impartidas en su investidura por Doctores Honoris Causa nombrados por esta universidad. Se trata por tanto de conferencias con importantes contenidos relacionados con la ciencia y el progreso del conocimiento, e impartidas por personalidades ilustres del mundo académico, científico o social.

En esta ocasión publicamos la **Lección inaugural** de la Universidad Autónoma de Madrid del Curso académico 1989-1990, pronunciado por **D. Carlos Sánchez López**, Catedrático Emérito de Física de Materiales de la UAM. Además, se incluye al final de esta Lección un **Anexo de actualización** sobre el tema de aquella conferencia que amablemente nos ha remitido el Dr. Carlos Sánchez, autor de la misma.

INTENTANDO COMPRENDER LA FUSIÓN FRÍA

Carlos Sánchez López

Catedrático Emérito de Física de Materiales de la UAM

ÍNDICE

1. LOS ATRACTIVOS Y LOS ENIGMAS DE LA SITUACION ACTUAL
2. ¿POR QUÉ ESTE REVUELO?
3. QUÉ ES FUSIÓN Y EN QUÉ CONDICIONES SE PRODUCE
 - 3.1. Fusión termonuclear en las estrellas
 - 3.2. Fusión termonuclear (caliente) controlada
4. FUSIÓN FRÍA: HISTORIA Y EL CASO MUONICO
5. FUSION FRIA ACTUAL O POR CONFINAMIENTO CRISTALINO
 - 5.1. Las características de los experimentos
 - 5.2. Productos nucleares en las reacciones de fusión
 - 5.3. Los primeros resultados experimentales
 - 5.4. Resultados de los experimentos de la UAM.
 - 5.5. Resumen (posiblemente incompleto) de datos experimentales
 - 5.6. Las propuestas teóricas y de interpretación,
6. COMENTARIO FINAL
7. AGRADECIMIENTOS
8. APÉNDICES
9. REFERENCIAS
- ANEXO DE ACTUALIZACIÓN (Septiembre 2022)

1. LOS ATRACTIVOS Y LOS ENIGMAS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

El fenómeno que todos conocemos como «Fusión Fría» (F.F.) presenta, al menos, dos aspectos de interés desde un punto de vista amplio:

a) El hecho físico-científico de que una fusión nuclear pueda producirse en el interior o en la superficie de un sólido metálico a temperaturas tan bajas como los ambientes e, incluso, inferiores. Hecho que no había sido previsto, que no encuentra una inmediata explicación sobre la base de nuestros conocimientos actuales y que, en cierto sentido, pudiera contradecir alguno de ellos. En efecto, la fusión de dos núcleos atómicos no se realiza espontáneamente sino bajo la influencia de algún tipo de «estímulo» (elevadas temperaturas del orden de decenas centenas de millones de grados o la presencia de alguna partícula catalizadora como el muón negativo, μ^{-1}). Ninguno de estos agentes parece estar presente en el interior de una pieza metálica (paladio (Pd), Titanio (Ti), etc.) en la que después de haber introducido átomos de Deuterio (Ver Apéndice 8.1), se produce una fusión nuclear. ¿Cuál es el «agente estimulante» que la hace posible?

b) La fusión nuclear es un proceso exoenergético, es decir, se realiza con desprendimiento de energía y, en consecuencia ofrece la posibilidad de ser utilizada por el hombre como fuente controlada, siempre que el balance energético global sea favorable, es decir, la energía liberada en la fusión sea mayor que la consumida para producir la. Un reactor nuclear de fisión [las actuales plantas nucleares explotan la fisión de los núcleos atómicos pesados (Ver Apéndice 8.2)] produce energía a razón de unos 100 w por centímetro cúbico (cc.) de material activo o combustible nuclear. Algunos investigadores han publicado o comunicado haber obtenido \square (10 — 200W por cc. de material activo en el proceso de FF, lo que le situaría a un nivel, energéticamente hablando, comparable al de otros procesos que el hombre ya explota y utiliza. Si a lo anterior se une la circunstancia ventajosa de la aparente simplicidad tecnológica de la FF frente a otras soluciones desarrolladas (fisión) o en fase de desarrollo (fusión termonuclear), se comprende fácilmente que el ciudadano se entusiasme ante la perspectiva de que la producción de energía mediante FF controlada pueda ser realidad en un futuro no lejano. Por otro lado, y sólo en principio, se podría destacar que previsiblemente la FF. produciría residuos radiactivos de vida corta, obviando así uno de los mayores inconvenientes de los reactores nucleares actuales y de otros sistemas de producción de energía. Para cerrar este punto es conveniente que demos un dato adicional: en cada reacción de fusión entre dos núcleos se produce una energía del orden de 1-10 MeV (Ver Apéndice 8.3 sobre unidades energéticas y equivalencias), lo que hace que para obtener 10 W/cc sea necesario que se produzcan unas $10E(13) — 10E(14)=10^{13} — 10^{14}$ reacciones de fusión por segundo y por cc. de metal estequiométrica mente saturado de núcleos reaccionantes ($\square 10^{22}$ núcleos/cc). Esta cifra de referencia se puede expresar no por cc. de metal activo sino por pareja de núcleos reaccionantes, siendo el resultado de $10^{-9} — 10^{-8}$ reacciones de fusión por pareja de núcleos y por segundo para libera 10 W/cc.

Estos dos aspectos atractivos y atrayentes del fenómeno de la FF no han sido, sin embargo suficientes para superar, hasta el momento las dos limitaciones que han llegado a convertirse en enigmas:

a) La primera es de tipo experimental, se resumiría diciendo: no conocemos las condiciones concretas, especialmente las de la pieza metálica a utilizar, que deben darse en un experimento de FF. para que este tenga éxito. Alguno o algunos factores determinantes en la reacción de fusión nuclear a baja temperatura nos son desconocidos. Es cierto que los diferentes investigadores han sido, en general, ambiguos e imprecisos a la hora de describir las circunstancias concretas de sus experimentos en publicaciones y comunicaciones, lo cual se ha interpretado con frecuencia, como el deseo de mantener un secreto. Pero también puede ocurrir que los propios investigadores ignoren la causa real del fenómeno, Personalmente creo que ambas situaciones se dan y que se silencian algunas condiciones particulares de los experimentos, sin tener seguridad de que sean decisivas, sólo a título de precaución. El hecho es que las pruebas que se realizan, todas de forma «correcta», presentan resultados desiguales. En esta situación la FF. está amenazada con pasar a engrosar las páginas del «Journal of Non Reproducible Results» y, sobre todo, no es aceptada de forma universal como fenómeno real.

b) Esta segunda limitación es, a mi juicio, mucho menos grave que la anterior y en cierto sentido consecuencia de ella. Desde el pasado mes de marzo se ha publicado o difundido una notable variedad de ideas, modelos, descripciones y cálculos que tratan de explicar los resultados experimentales positivos existentes. Algunos de los intentos realizados llegan a la conclusión de que el fenómeno no es explicable partiendo de hipótesis basadas en la Física de Estado Sólido actual. Otros, que alcanzan conclusiones más positivas, no han podido ser contrastados experimentalmente por la falta de control descrita en el punto anterior. No existe, por tanto, todavía un esquema de interpretación teórica que se acepte con generalidad y que pueda servir de orientación y guía a la hora de realizar experimentos. Sin embargo, y quiero insistir en ello, esta segunda limitación es menor que la primera. Se da en otros descubrimientos recientes tales como la superconductividad a alta temperatura y, sin embargo, nadie duda de la existencia de esos superconductores y de que su temperatura crítica es 70-90° K.

Entonces...

2. ¿POR QUÉ ESTE REVUELO?

El 23 de marzo de este año 1989 dos periódicos estadounidenses, el Wall Street Journal y el Financial Times, hacían público que tres investigadores, el inglés Fleisch Mann y los norteamericanos Pons y Hawkins, trabajando en la Universidad de Utah (EE.UU.), habían logrado producir fusión de núcleos de Deuterio (Deuterones) a temperatura ambiente mediante un sencillo proceso electroquímico llevado a cabo en una cubeta cilíndrica de 9 cm. de diámetro y 15 cm. de altura. Ese día y una vez que la noticia estaba en la calle, los mismos investigadores informaron en una rueda de prensa sobre su veracidad y confirmaban que, como consecuencia de los procesos de fusión producidos habían obtenido cantidades de energía apreciables (del orden de 10-20 W por cc. de electrodo metálico utilizado) de una forma continua durante 120 h., lo cual suponía un resultado total de $\sim 4 \text{ MJ/cm}^3$. Energía que resultaba ser, según los citados investigadores, unas 4-10 veces superior a la consumida en producirla y, por tanto, se concluía que la fusión nuclear realizada era un proceso energéticamente viable. Afirmaban Fleischmann, Pons y Hawkins que el proceso de fusión nuclear en su vaso electroquímico podía liberar cantidades de energía superiores a las citadas y que, he hecho, en alguno de sus experimentos estas cantidades habían sido tales que se había destruido parte de la instalación experimental. Sin embargo, otros parámetros delatores de la existencia de fusión nuclear tales como la producción de neutrones no estaban en armonía con los valores de la energía obtenidos sino muy por debajo (unos nueve o diez órdenes de magnitud). En muy pocos días los medios de comunicación reprodujeron y difundieron a escala prácticamente mundial las declaraciones de los investigadores de Utah. Casi simultáneamente otro grupo en las Universidades Brigham Young (Utah) y Arizona, encabezados por el físico nuclear S. E. Jones, daba a conocer que habían detectado la existencia de FF. en un experimento análogo al realizado en la Universidad de Utah, pero que la producción de energía era exigua y, en ningún caso, alcanzaba los límites de la rentabilidad energética. El parámetro medido por esos investigadores era el flujo de neutrones creados que también resultaba inferior al difundido por Fleischmann, Pons y Hawkins.

Laboratorios de investigación de todo el mundo comienzan rápidamente experimentos para intentar reproducir los resultados anunciados, especialmente los de naturaleza energética. Las primeras noticias a través de la prensa aseguran que diferentes laboratorios en distintos países reproducen y confirman la existencia del fenómeno FF. El máximo de entusiasmo se alcanza cuando se hace público un nuevo procedimiento de realizar fusión nuclear a temperatura aún más baja que la ambiente (= 70° K). Un grupo de investigadores italianos del ENEA (Agencia Nacional para las Energías Renovables) dirigidos por Scaramuzzi anunciaba que había detectado (a través de la captación de neutrones emitidos) la existencia de fusión nuclear a temperaturas inferiores al ambiente utilizando gas deuterio introducido en esponja de virutas de metal Titanio, un procedimiento sumamente diferente al empleado en las Universidades de Utah. La situación era de considerable euforia. Se convocan de forma acelerada congresos, reuniones, etc¹. en diferentes partes del mundo, principalmente en EE.UU., con

asistencias multitudinarias. Los investigadores obtienen y presentan sus resultados de forma agitada. No todos son afirmativos y la existencia y realidad de la FF. no es universalmente verificada. Comienza una fuerte polémica entre grupos que aseguran haber producido y detectado la fusión nuclear a temperatura ambiente y aquellos que no han logrado reproducir el fenómeno. Estos últimos acusan a los primeros de realizar los experimentos de forma imperfecta y errónea (es curioso, pero creo que esa acusación no se ha producido todavía en sentido contrario).

Cuando se publican los trabajos de Fleischmann y Pons² Jones y sus colaboradores³ y Scaramuzzi y su grupo⁴, pocos meses después de la noticia inicial, se han difundido términos como «Cold Confusión»⁵, «Unclear Fusión»⁶ o se ha llegado a afirmar que la FF. es un fenómeno que se puede englobar en la Ciencia Patológica propuesta por Langmuir⁷. Todo ello motivado, esencialmente, por el desconocimiento existente de la clave que asegure la reproducibilidad experimental del fenómeno. Una razón de peso indudable e indiscutible. Al mismo tiempo, sin embargo, la FF, tal como afirmaba la revista *Research and Development* en su número de julio de este año⁸, está «calentándose» desde el punto de vista de la enorme rentabilidad económica que supondría su posible utilización futura. En efecto, la U.S. Patent and Trademark Office recibió unas 50 solicitudes de patentes sobre FF. en los tres meses siguientes a su descubrimiento. La universidad de Utah en Salt Lake City presentó siete solicitudes; el bien conocido Massachusetts Institute of Technology (MIT) en Cambridge, Ma, confirmó que había presentado varias patentes aunque declinó declarar su número; la Universidad de Stanford, Palo Alto, ha participado en la carrera con dos solicitudes, etc. Según informaciones privadas recibidas por mí las empresas privadas no se han quedado a la zaga y alguna de ellas ha llegado a presentar hasta cerca de veinte solicitudes.

¿Es posible entender la situación presente? ¿Es o no real el fenómeno FF.? Y en el supuesto de que lo sea ¿Se encontrará la clave de su reproducibilidad experimental? Intentaremos tomar el hilo de esta cuestión desde un principio para saber si estamos en el camino de responder a esas preguntas y, por tanto, de comprender la FF.

3. QUE ES FUSIÓN Y EN QUÉ CONDICIONES SE PRODUCE

Se tiene una reacción de fusión cuando dos núcleos atómicos (generalmente ligeros (ver Apéndice 8.2)] se unen para dar origen a otro núcleo más pesado y alguna o algunas partículas atómicas. La masa de los núcleos reaccionantes es, en los casos de interés para esta lección, superior a la masa de los productos de la reacción. La energía liberada en la reacción de fusión procede de la transformación de esa diferencia de masas según la conocida ecuación de Einstein $E = mc^2$ (m = masa que se transforma en energía, c = velocidad de la luz). Así, por ejemplo, la liberación de una energía de 1 MeV se obtiene por la transformación de una masa de 2×10^{-25} g., y, lógicamente, la conversión de 1 g. de masa en energía daría $\sim 6 \times 10^{26}$ MeV = $2,4 \times 10^{13}$ cal. La energía liberada en la reacción de fusión aparece como energía cinética del núcleo y partículas producto, por lo que éstos han de ser convenientemente frenados y su energía cinética transformada en calor si se desea explotar la reacción de fusión como fuente de energía.

Algunas de las reacciones de fusión que se conocen hoy día son (ver Apéndice 8.1 en relación con la nomenclatura utilizada):

1. $d + d + 4 \text{ He}$ (23,9 MeV), $Q = 23,9 \text{ MeV}$
2. $d + d + 3 \text{ He}$ (0,82 MeV) + n (2,45 MeV), $Q = 3,27 \text{ MeV}$
3. $d + d + p$ (3,02 MeV) + t (1,01 MeV), $Q = 4,03 \text{ MeV}$
4. $d + t + 4\text{He}$ (3,5 MeV) + n (14,1 MeV), $Q = 17,6 \text{ MeV}$.
5. $\text{He}^3 + d + 4 \text{ He}$ (3,6 MeV) + p (14,7 MeV), $Q = 18,3 \text{ MeV}$
6. $p + n \text{ D} + \gamma$ (2,22 MeV)
7. $p + d + \text{He} + \gamma$ (5,4 MeV)
8. $p + p + d$ (25 MeV) + e $Q = 25 \text{ MeV}$

Donde d = deuterón, n = neutrón, p = protón, t = tritón, γ = rayo γ y Q es la energía liberada en el proceso. Generalmente estas reacciones se realizan a través de un estado intermedio de vida muy corta que se transforma en los productos finales. Así, por ejemplo, considerando las reacciones 1-3 anteriores, el producto de la primera (${}^4\text{He} \rightarrow {}^3\text{He} + n$ o $p + t$). Este resultado se expresa diciendo que la primera reacción es varios millones de veces menos probable que las 2 ó 3 y con ello se indica la probabilidad relativa de encontrar ${}^4\text{He}$ como producto de la reacción d + d.

Sin embargo, y a pesar de lo dicho y escrito antes, creo que es conveniente puntualizar que nuestros conocimientos actuales de las reacciones de fusión proceden de su estudio en situaciones en que los núcleos reaccionantes son libres y poseen energías superiores a las que les corresponderían si estuvieran a temperatura ambiente (termalizados). La Física Nuclear, especialmente cuando trata de desintegraciones producidas por bombardeo⁹ o de reacciones de fusión catalizadas muonicamente¹⁰⁻¹², se ocupa de esas situaciones. Sin embargo, cuando los núcleos reaccionantes están dentro de un sólido, por tanto no libres, y en principio con energías bajas ($\square 10^{-2}$ eV), ya que están termalizados, puede que algunas de nuestras conclusiones anteriores no sean estrictamente aplicables en esta situación. La influencia del entorno físico en que se encuentran los núcleos sobre la validez de algunos conceptos establecidos ha sido destacada por varios autores. H. C. Dudley escribió en Chemical and Engineering News que las velocidades de desintegración de los núcleos podrían verse influenciadas por el entorno en que se encontraban. Esta sugerencia mereció las críticas del doblemente premio Nobel Linus Pauling, pero la realidad es que se han llegado a encontrar variaciones hasta del 4 por 100 en aquella velocidad. Más interesante puede ser la sugerencia realizada recientemente por P. Paolo¹³, evocando una propuesta de Oppenheimer, y Phillips¹⁴ quienes afirmaron, en 1935, que al considerar la reacción d + d con baja energía por parte de ambos núcleos (como ocurriría si estuvieran termalizados en un sólido a temperatura ambiente), el protón y el neutrón de un deuterón que es atrapado por otro no se comportan como un núcleo, ya que el deuterón que hace de blanco repele al protón pero no al neutrón. En consecuencia, el neutrón puede ser capturado por el deuterón-blanco y el protón ser repelido por él. Este proceso, de ser operativo en sólidos, haría que la reacción 3 escrita anteriormente fuera mucho más probable que la 2 (cuando, por el contrario, es bien sabido que si los nucleones son libres ambos tienen aproximadamente igual probabilidad de suceder) o bien que en lugar de considerar las reacciones 2 y 3 tuviéramos que tener en cuenta la 7. En resumen, no queremos destacar el hecho de que el entorno físico altere los valores numéricos de algunos parámetros, esto es obvio, sino apuntar la posibilidad de que en nuevas condiciones poco experimentadas y analizadas puede ser dudosa la aplicabilidad de conclusiones obtenidas en otras situaciones experimentales.

Examinemos ahora, esquemáticamente, las condiciones que deben darse para que tenga lugar una reacción de fusión, en particular la reacción d + d. Existen dos tipos de interacciones significativas entre dos núcleos atómicos: una repulsiva, la coulombiana, y otra atractiva, la nuclear fuerte. Esta de mucho menor alcance que aquella, es decir, la fuerza nuclear fuerte sólo es de cierto valor si los núcleos se aproximan extraordinariamente entre sí [a una distancia del orden de (1-2) fm = (1-2)X 10E (-13) cm (ver apéndice 8.4)], ya que obedece a un potencial de tipo Yukawa. Sin embargo, la fuerza de repulsión electrostática entre cargas eléctricas de igual signo es notablemente intensa a distancias mucho mayores que las anteriores impidiendo que los núcleos se acerquen lo suficiente como para que comience a actuar la fuerza atractiva y se produzca la fusión nuclear. A una distancia entre centros de los núcleos de 1 Å = 10E (-8) cm., la fuerza repulsiva coulombiana entre dos deuterones es del orden de 2,3 x 10E (-8) N, bajo la cual adquirirían una aceleración de 10E (9) m/s², algo extraordinario. Los físicos describen esta situación en términos de barreras y pozos de potencial. Entre dos cargas de igual signo se crea una barrera de potencial coulombiana que los núcleos deben superar para llegar a fundirse. Combinando los efectos atractivos y repulsivos de ambas interacciones, se ha calculado¹⁵ que los dos deuterones deben acercarse a una distancia entre (3-10) fm. para que la fusión nuclear se produzca a un ritmo detectable con las actuales técnicas de laboratorio (posiblemente en la actualidad seamos capaces de detectar fusiones a un ritmo de 10E (-25) por segundo y por par de deuterones). Para llegar a ese grado de aproximación venciendo la barrera de potencial coulombiana, es necesario que los

deuterones, considerados libres, adquieran enormes energías, que sólo se les pueden conferir calentándolos a temperaturas del orden decenas de miles de millones de grados ($\sim 10^8$ K), unas mil veces superiores a las existentes en el núcleo del Sol. En estas condiciones no parece que hubiera sido posible la existencia de la fusión nuclear, sino en circunstancias extraordinariamente exóticas y difíciles de imaginar. Y, sin embargo, la fusión nuclear existe y se produce en condiciones menos drásticas que las anteriores. La explicación a esta aparente contradicción fue dada por Gamow e, independientemente, por Gurney y Condon proponiendo la existencia del «efecto túnel», un efecto cuántico que se resume diciendo que no es nula (aunque sí pequeña) la probabilidad de que los núcleos reaccionantes se aproximen atravesando la barrera de potencial, sin necesidad de remontarla, algo que la física clásica no puede justificar. La situación es en todo semejante a la que se daría si dos personas estuvieran separadas por una montaña (barrera de potencial) y no siendo posible rodearla tuvieran que encontrarse remontándola. El consumo de energía para llegar al encuentro es mucho menor si a través de la montaña existe un túnel. El efecto túnel hoy es bien conocido por físicos nucleares y de estado sólido, está ampliamente comprobado y de su utilización se han derivado importantes aplicaciones. Gracias a la propuesta de Gamow comprendemos muchos aspectos de la fusión nuclear, en particular los que se analizan en las tres secciones que siguen.

Conviene ahora introducir algunas nociones que serán útiles en el resto de la lección. El ritmo al que se produce la reacción de fusión, R (número de parejas de deuterones que se fusionan por unidad de tiempo en unas determinadas circunstancias) es proporcional a la probabilidad de que los núcleos se aproximen entre sí a distancias tales que entre ellos se produzca una fusión 16-20. Se expresa:

$$R = K |\psi(\rho)|^2 \quad [1]$$

donde $|\psi(\rho)|^2$ es la amplitud de probabilidad de que los dos núcleos se aproximen a la distancia ρ es la función de onda que describe su movimiento relativo. La separación internuclear debe ser la distancia típica a la cual se produzcan interacciones de tipo nuclear, $\rho \approx 10$ fm. K es la constante de fusión nuclear cuando los núcleos reaccionantes están en un estado relativo S (los procesos de fusión para estados de mayor momento angular tienen muy baja probabilidad debido a la barrera centrífuga), depende, exclusivamente, de la naturaleza de dichos núcleos y está relacionada con la correspondiente sección eficaz de la reacción de fusión a bajas energías. K se determina mediante experimentos de difusión (Scattering) con energías $E \geq 10$ KeV en los cuales se mide la sección eficaz, $\sigma(E)$. σ está relacionada con la función astrofísica $S(E)$ (función que varía lentamente con la energía y que juega un papel parecido al de k^{-18} en el espacio libre) y con un potencial coulombiano a través de la expresión:

$$\sigma(E) = [S(E)/E] \exp(-2\pi\eta_0) \quad [2]$$

donde η_0 es el parámetro de Sommerfeld. Con ciertas simplificaciones hipóticas se obtiene la expresión:

$$K = \lim_{E \rightarrow 0} \frac{S(E)}{\pi\alpha\mu} \quad [3]$$

Con μ la masa reducida del sistema y $\alpha = 1/137$ la constante de estructura fina. Por último, la influencia del efecto túnel sobre el ritmo de la reacción de fusión se mide a través del factor de penetración de la barrera de potencial, que en la aproximación WKB, aquí considerada, aparece en la función de onda que relaciona las expresiones [1] y [2]. En efecto, la amplitud de probabilidad para distancias internucleares próximas a cero es:

$$|\psi(0)|^2 \approx (1/V) 2\pi\eta \exp(-2\pi\eta) \quad [4]$$

donde V es el volumen ocupado por los dos núcleos y n , el factor de penetración, está dado por:

$$n = \frac{1}{V} \int_{L_0}^0 [S^*(\Lambda(L) - E^0)]^{1/2} dL \quad [2]$$

con $V(r)$ la barrera de potencial y E , los valores propios de la energía relativa. El rango, r_0 , al cual se extiende la integral es la región de movimiento que está prohibida clásicamente. En estas condiciones se obtienen los siguientes valores para los parámetros utilizados o busca dos 17:

REACCION	μ (MeV)	$S(0)\text{MeV}\cdot\text{b}^*$	K ($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
$p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	625,411	$2,5 \times 10\text{E}(-7)$	$5,2 \times 10\text{E}(-22)$
$p + t \rightarrow {}^4\text{H} + \gamma$	703,336	$2,6 \times 10\text{E}(-6)$	$4,8 \times 10\text{E}(-21)$
$d + d \rightarrow {}^3\text{He} + n$	937,807	$5,4 \times 10\text{E}(-2)$	$7,5 \times 10\text{E}(-17)$
$d + d \rightarrow t + p$	937,807	$5,6 \times 10\text{E}(-2)$	$7,8 \times 10\text{E}(-17)$
$d + d \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$	937,807	$2,2 \times 10\text{E}(-10)$	$3,1 \times 10\text{E}(-25)$
$d + t \rightarrow {}^4\text{He} + n$	1124,65	$1,2 \times 10\text{E}(1)$	$1,4 \times 10\text{E}(-14)$

* $\text{b} = \text{barn} = 10\text{E}(-24) \text{cm}^2$

Puede observarse que los valores de K para las diferentes reacciones $d + d$ indican la baja probabilidad de obtener ${}^4\text{He} + \gamma$ como producto. Sin embargo, la reacción $p + d$ resulta, en general, más probable que la $d + d$ a pesar del inferior valor de K debido a que la menor masa reducida favorece la penetración de la barrera.

3.1. Fusión termonuclear en las estrellas

Hoy sabemos que la energía radiada por las estrellas tiene su origen en los procesos de fusión que se desarrollan en su interior. En particular, el Sol emite anualmente $\sim 6 \times 10\text{E}(47) \text{MeV} = 2,4 \times 10\text{E}(34) \text{cal.}$, y de esa energía a la Tierra llegan cada año $\sim 6 \times 10\text{E}(37) \text{MeV} = 2,4 \times 10\text{E}(24) \text{cal.}$, aproximadamente unas mil veces la energía total que consumimos los humanos en igual período de tiempo.

Arthur Eddington en su libro «The internal constitution of the stars» publicado en 1926 afirmó, en cierto sentido contra la opinión general de sus colegas, que la energía se producía en el Sol mediante procesos de fusión. El mismo calculó que la temperatura en el centro de las estrellas era de unos 40 millones de grados, insuficientes para justificar los procesos de fusión y el ritmo necesarios. A esas temperaturas los átomos del Sol (se sabía ya que eran hidrógeno) están ionizados en forma de protones que se mueven a una velocidad de unos 1.000 Km/s. A esa velocidad dos protones que se aproximen entre sí se desvían mutuamente al repelerse electrostáticamente y no llegan a acercarse lo suficiente para fusionarse y no llegan a acercarse lo suficiente para fusionarse (fig. 1). A pesar de esta contrariedad Eddington insistió en su convicción y escribió: «No discutimos con el crítico cuando afirma que las estrellas no son lo bastante calientes para permitir este proceso, sólo le decimos que debe buscar y encontrar un lugar más caliente»²¹.

En el año 1929 Robert Atkinson y Fritz Houtermans trabajaron sobre la posibilidad de que en las estrellas se produjese también el efecto túnel que no hacía mucho Gamow había propuesto para explicar la desintegración del uranio. En marzo de ese año enviaron un manuscrito a la revista «Zeitschrift für Physik» titulado «¿Cómo se puede cocer un núcleo de helio en un pote de potencial?». El editor lo aceptó para publicación, pero haciendo gala de la sublime seriedad nor-europea cambió el título por otro más formal: «Sobre la posibilidad de la formación de elementos en las estrellas». Demostraban que a 40 millones de grados los procesos de fusión eran posibles y podían darse en el Sol y otras estrellas.

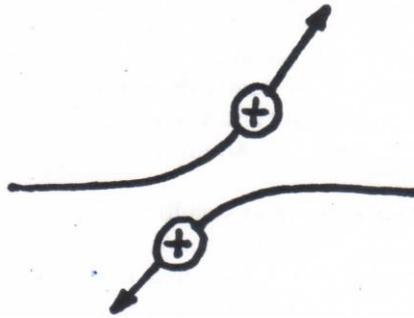


FIGURA 1

Trabajos posteriores de varios autores, entre otros Gamow, demostraron que en las estrellas pueden darse dos cadenas cerradas de reacciones de fusión: el ciclo del carbono y la cadena protón-protón. Aquél opera de forma dominante en las estrellas más calientes y ésta en las menos. La cadena protón-protón explica correctamente la energía radiada por el Sol.

3.2. Fusión termonuclear (caliente) controlada

El hombre consiguió producir reacciones de fusión de núcleos ligeros con liberación de enormes cantidades de energía cuando hizo explotar la primera bomba H (hidrógeno) en la isla Elugelab del Pacífico, el 1 de noviembre de 1952. Una bomba H de 100 megatones libera $\approx 6 \times 10^{17}$ MeV = 2.4×10^{17} cal. (unas 30.000 bombas como ésta accionadas anualmente serían suficientes para abastecer el consumo mundial de energía: me temo que no es una idea nueva) mediante la producción de $\approx 2 \times 10^{30}$ reacciones de fusión prácticamente simultáneas, es decir, se empleó aproximadamente una tonelada métrica de hidrógeno. A pesar de lo deslumbrante de los datos anteriores, lo más ingenioso del artefacto fue la forma en que se consiguieron las elevadísimas temperaturas (decenas de millones de grados) necesarias para producir tan altos ritmos de fusión: dentro de la bomba Hiba una bomba A (atómica de fisión) que al explotar actuaba detonador de la primera. ¡Admirable! Se tenía una fusión no controlada.

El hombre había demostrado que podía obtener energía a partir de procesos de fusión nuclear, pero si deseaba utilizar esos procesos para abastecer los consumos domésticos e industriales era necesario poder realizarlos de forma controlada. Comenzó, así, una intensa y hasta el momento extensa investigación en el campo que familiarmente se denomina «fusión caliente», y más correctamente «fusión termonuclear». Proyectos gigantes («big science» se suele denominar, a mi juicio eufemísticamente, a este tipo de ciencia) sobre el tema se desarrollan en los cuatro grandes bloques.

Para obtener el ritmo de fusiones mínimo que haga que el proceso se convierta en una fuente de energía rentable es necesario que la mezcla de núcleos (isótopos de hidrógeno) ligeros alcance una temperatura de unos 100 millones de grados, a la cual las partículas reaccionantes adquieren una energía de ~ 10 KeV, equivalente a una velocidad de los núcleos de, aproximadamente, un tercio la de la luz. A estas temperaturas la densidad del combustible que se emplee tiene que ser baja ($\approx 10^{-3}$ la densidad del aire), de lo contrario la presión interna lo dispersaría. Un problema central es encontrar un recipiente que pueda contener el combustible con las condiciones citadas: ningún material conocido puede soportar 100 millones de grados y si las paredes del recipiente están a temperaturas inferiores el combustible se enfriaría, deteniéndose la reacción, al entrar en contacto con ellas. Este problema de confinamiento se intenta resolver por dos vías diferentes de investigación: confinamiento magnético y confinamiento inercial. Tratar estas tecnologías nos llevaría más lejos de lo que es acorde con los objetivos de esta lección y, por otra parte, dudo de que mi formación me permite hacerlo con el suficiente detalle.

4. FUSION FRIA: HISTORIA Y CASO MUÓNICO

Las investigaciones sobre fusión nuclear y los intentos de producirla a temperatura ambiente no son nuevos. Los trabajos de dos investigadores de los años 20 en Berlín, Paneth y Peters, han sido traídos a colación con frecuencia durante estos últimos meses como paradigma de errores cometidos en los experimentos y, hasta cierto punto, de la inviabilidad de la fusión nuclear en un medio sólido. F. Paneth y K. Peters publicaron el 17 de agosto de 1926 un trabajo²² en el que afirmaban que, tras años de investigaciones, habían logrado tener éxito y transformar hidrógeno en helio (lo que implica reacciones semejantes a la cadena protón-protón solar o del tipo p+d) con la ayuda de partículas de metal: utilizaban Pd finamente dividido (esponja; partículas o asbesto paladinizado) que absorbía hidrógeno. Observaban que el gas residual que se producía después de 12 h. de contacto H₂-Pd contenía He en cantidades del orden 10E(-9) c.c. y tanto mayores cuanto mayor era el tiempo de contacto H₂-Pd. No detectaron energía apreciable que se liberase en el proceso por lo que concluían que, quizás, se emitía en forma de radiación y. El 17 de septiembre del mismo año el Morning Post publicaba una noticia de la agencia Reuter desde Berlín reproduciendo las características del hallazgo y Na ture (Vol. 118, págs. 455 y 556) comentaba, sobre la base de la noticia periodística, las dificultades inherentes a medir cantidades extremadamente pequeñas de He.

A la publicación citada de Paneth y Peters siguieron otras²³⁻²⁴ y, finalmente, en abril y mayo de 1927, escribieron sendas cartas a «Die Naturwissenschaften» y «Nature»²⁵⁻²⁶ aceptando que en sus experimentos podrían haber cometido errores y que, por tanto, no eran concluyentes respecto a la supuesta transformación de hidrógeno en helio.

Un caso que ha tenido un final bien distinto al anterior es el de la fusión catalizada por muones o fusión muónica, consistente en que en determinadas circunstancias la presencia de un muón acelera el ritmo al cual se producen las reacciones entre dos núcleos. El caso de más interés para esta lección es la fusión en una molécula ionizada de deuterio, es decir, una molécula que ha perdido un electrón (D1) tal y como se esquematiza en la fig. 2. En esta situación el factor de penetración de la barrera de potenciales²⁷:

$$\eta = \exp(-n \sqrt{\mu})$$

donde la constante n varía según el modelo de cálculo y, en consecuencia, el valor de n. Los citados autores²⁷ han obtenido n = 4.13 en tanto que Zeldovich y Gershtein²⁸ han publicado valores de n = 3.0—3.3, lo cual conduce a que en este último caso el factor de penetración de la -barrera de potencial sea entre 15 y 21 órdenes de magnitud menor que en el primero y, en consecuencia, el ritmo de fusión espontánea de los dos deuterones de la molécula ionizada queda reducido drásticamente. Según Koonin y Nauenberg este ritmo resulta ser de 3x10 E (64) por par de deuterones y segundo (p.p.d./s) en tanto el valor calculado en²⁹ fue de □10 E(-75) fusiones p.p.d./s., es decir, diez órdenes de magnitud inferior. Es de observar que pequeñas variaciones en los parámetros que configuran el sistema conducen a elevadas alteraciones de los ritmos de fusión, en particular la energía efectiva con que los núcleos asaltan la barrera de potencial o la distancia entre ellos. Esta distancia depende de las características, de la masa y carga del electrón que completa la molécula ionizada, en la cual la separación entre núcleos es de 0.74

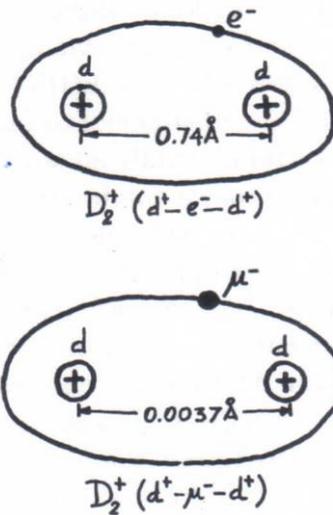


FIGURA 2

Si se sustituye el electrón por otra partícula con igual carga pero masa superior, el ritmo de fusión se ve sensiblemente mejorado por que la separación nuclear en equilibrio disminuye. Efectivamente, dicha separación varía con m_e/m , donde m_e es la masa del electrón y m la de la supuesta partícula. Si el electrón se sustituye por otra partícula con 2, 5, 10 veces su masa, la reacción $d+d$ tendría los siguientes ritmos de fusión:

	$m_e/m = 1$	1/2	1/5	1/10
RITMO (p.p.d./s)	$10 \times E(-64)$	$10 \times E(-40)$	$10 \times E(-20)$	$10 \times E(-9)$
SEPAR.INTN.	0.74 Å	0.37 Å	0.15 Å	0.07 Å

El muón negativo (μ) es una partícula cuya carga es igual a la del electrón y cuya masa es 207 (\square 200) veces superior. Si el electrón de la molécula D, se sustituye por un muón se obtiene una molécula muónica (fig. 2), en la que la separación entre núcleos es 0.0037 Å, doscientas veces inferior a la correspondiente distancia en la molécula monoeléctrica. En consecuencia, el ritmo de fusión es tremendamente mayor, \square $10 E(10)$ f.p.d./s, unos 75 u 85 órdenes de magnitud superior al que se da en $d-e-d$.

Los muones, por tanto, catalizan la reacción $d+d$, proceso que se denomina fusión muónica, bien conocida teórica y experimentalmente en la actualidad ^(28, 30-33). La fusión muónica ha sido examinada como posible fuente de energía, sin embargo, ha sido descartada por el momento porque el balance energético global no es positivo. En efecto, la vida media del muón es extremadamente corta (del orden de $l_{us} = 1X E(-6)$ s.) y durante ese tiempo es capaz de catalizar unas 150 reacciones de fusión como máximo en sistemas constituidos exclusivamente por núcleos reaccionantes. Esa cifra de fusiones catalizadas es insuficiente, ya que para que la fusión muónica fuese energéticamente viable son necesarias entre 700 y 1.000 reacciones catalizadas por muón.

Los μ , además del importante papel descrito, están jugando otros muy significativos en la actual problemática de la fusión fría: se ha propuesto que son los responsables de los fenómenos de fusión observados en Ti y Pd deuterados. Este punto de vista se analizará en el apartado 5.6.

5. FUSION FRIA ACTUAL O POR CONFINAMIENTO CRISTALINO

La F.F. actual se basa en introducir átomos ligeros (principalmente de deuterio) en una red cristalina metálica (Ti, Pd...) donde, parcial o totalmente ionizados, reaccionan entre sí en la forma de fusiones nucleares. El hecho de que los deuterones se encuentren confinados en un sistema cristalino (policristalino) ha dado origen a la denominación que también encabeza este apartado. Esta definición descripción de la F.F. necesita una puntualización: es evidente que de ella parece deducirse que las

reacciones de fusión nuclear tiene lugar en el volumen (interior) del metal. Sin embargo, debo precisar que aunque este es el punto de vista aceptado con más generalidad, no se puede rechazar¹ la posibilidad de que las reacciones de fusión tenga lugar en la superficie del sólido o, al menos, en un número de capas atómicas reducido próximas a la superficie. Obviamente, tampoco es rechazable por el momento la alternativa total: que el medio soporte de las reacciones sea el sólido globalmente (superficie y volumen).

Se han empleado hasta el momento dos procedimientos para introducir átomos de deuterio en las redes metálicas, lo que ha dado origen a dos tipos distintos de F.F.*:

- Por electrolisis de agua pesada (D_2O), utilizado por Fleischmann, Pons y Hawkins², por Jones y su equipo³ y por otros investigadores y que se ha denominado F.F. electrolítica.
- Mediante sobrepresiones de gas deuterio (D_2) que rodea a la matriz metálica en una cámara cerrada. Fue experimentado por primera vez por Scaramuzzi y un grupo extenso de investigadores⁴. Se denomina fusión por gas (a veces «fusión helada» (gelata, en italiano) porque ha tenido lugar a temperaturas muy bajas, $-200^\circ C$).

En lo que sigue de esta lección trataremos ambas vías, pero, sin embargo, de forma desigual, prestando mayor atención a la primera ya que ha sido la más experimentada y con la que se han obtenido los resultados más polémicos.

5.1. Las características de los experimentos

En los experimentos de tipo electrolítico se emplea una instalación como la que se muestra en la fig. 3; una cubeta o vaso electroquímico con agua pesada y algunos aditivos. La pureza del D_2O utilizado ha variado de laboratorio a laboratorio (96%-99%), siendo la mayor impureza agua ligera (H_2O). La obtención de agua pesada implica un enriquecimiento en el tercer isótopo del hidrógeno, Tritio, por lo que su concentración no es despreciable aunque sí baja. No existe, por el momento, un criterio respecto a la pureza más conveniente del D_2O que se debe utilizar.

* Después de redactada esta lección la prensa nacional (EL PAÍS, 8-9-89) ha publicado la existencia de «fusión tibia». Esperaremos a la prometida publicación en Phys. Rev. Letters.

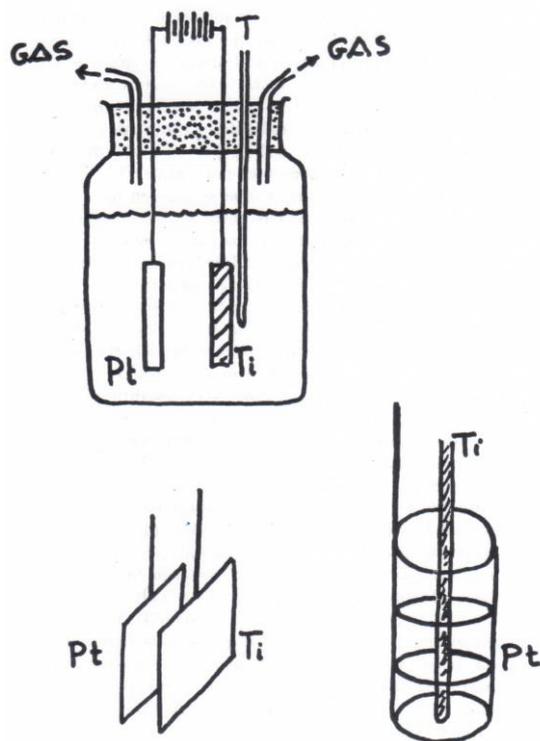


FIGURA 3

En principio, los átomos de hidrógeno penetran en la red del metal con mayor facilidad que los de deuterio, ocupando aquellas posiciones cristalinas que después no serían accesible a éstos, por lo que se ha insistido en la utilización de agua pesada de la mayor pureza posible. Sin embargo, esta restricción no ha sido garantía de resultados favorables y, de hecho, se ha experimentado con mezclas de D^{20} y H^{20} de diferentes porcentajes ³⁴.

La diversidad de aditivos que se añaden al D^{20} es también considerable. Con casi total generalidad se suele emplear una sal de Litio (Li), normalmente LiDH (o su versión deuterada, LiOD, para evitar la presencia de protones H^+) por diversas razones: en primer lugar, para aumentar la conductividad eléctrica del electrolito, pero sobre todo porque siendo el Li un átomo ligero es introducido con facilidad en el metal y puede participar en las reacciones de fusión. En los primeros trabajos se empleó LiOD porque, según argumento de los autores, el Li confiere mayor estabilidad a la red cristalina metálica una vez que está deuterada. En una compleja mezcla de sales para intentar reproducir ciertos medios geológicos terrestres en los que se produce fusión nuclear espontáneamente. Jones y sus colaboradores han argumentado, además, que la deposición de iones metálicos (de Fe, etc.) en la superficie del Pd o Ti es fundamental para que se produzcan reacciones de fusión. Sin embargo, la argumentación a favor de este punto de vista es pobre.

En la cubeta electrolítica que contiene D_2O se introduce el metal (Pd, Ti, etc.) en el que se desea que tenga lugar la fusión nuclear. Le acompaña otro electrodo, generalmente de Pt, que debe ser inerte y con poca capacidad de aceptación de Deuterio. Ambos se polarizan eléctricamente, el metal experimental negativo o cátodo y el Pt como positivo o ánodo, mediante una batería, fuente de alimentación, potencióstato o galvanostato. El electrodo negativo de Ti o Pd atrae a los iones D^+ (núcleos de deuterio) que después de neutralizados se introducen en el metal. La elección de Pd y Ti como primeros metales para la experimentación en fusión fría está justificada por la alta capacidad de admisión de hidrógeno (y en consecuencia de deuterio) que han demostrado tener ³⁵. Una vez el deuterio ha entrado en el metal éste se transforma en una nueva substancia, deuteruro de Pd o de Ti, o, más frecuentemente, en un sistema en el que coexisten metal y deuteruro. Los deuteruros (PdD , TiD_2) son en sus características fisicoquímicas totalmente semejantes a los correspondientes compuestos con hidrógeno, hidruros (PdH , TiH) ³⁵ (ver apéndice 8.5 sobre propiedades y estructuras de metales y deuteruros).

Se tiene en la actualidad un grave desconocimiento de las características que debe reunir el cátodo metálico para la experimentación en F.F. Aspectos fundamentales deben ser: estado superficial, pureza, grado de perfección cristalina y densidad y tipo de defectos, entre otros. Superficies no limpias (oxidadas, etc.) son barreras para la asimilación de deuterio por el metal. Ciertas impurezas actúan negativamente en el metal fijando la posición de los deuterones y reduciendo su capacidad de reacción con otros. Son especialmente perjudiciales el oxígeno y el hidrógeno por las razones expuestas anteriormente. Ciertos defectos cristalinos (dislocaciones, microgrietas, conglomerados de vacantes, etc.) pueden ser sumideros para los deuterones, pudiéndose alcanzar en ellos muy elevadas densidades. Según algunos autores, es en estos defectos cristalinos donde se produce la F.F.

La forma de los electrodos no parece esencial en el proceso. Dos geometrías utilizadas con frecuencia son las que se han dibujado en la fig. 3: configuración plano paralelo y configuración cilíndrica concéntrica.

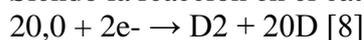
Otros instrumentos de menor relevancia completan el equipamiento electroquímico: electrodo de referencia, etc. De importancia es la utilización de sensores de temperatura (termopar, termistor, etc.) si se desea tener referencia de la temperatura de la muestra y saber la energía desprendida en el proceso de fusión.

Las diferencias de potencial entre ánodo y cátodo suelen ser 10-20 V y la intensidad de la corriente que pasa por la cubeta electroquímica de 10 a 100 mA/cm². Estos valores implican que la potencia eléctrica suministrada sea del orden de 1-2 W/cm², donde el cm² se refiere a superficie del cátodo. Las muestras de tamaño normal, suelen ser de 0,5 cm², aproximadamente, lo que implica una potencia eléctrica suministrada por unidad de volumen de muestra de 2-5 w/cm³

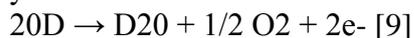
Bajo la acción de la corriente eléctrica el agua pesada se descompone en la forma.



Siendo la reacción en el cátodo:



y el ánodo:

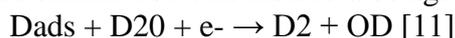


Ambos [8] y [9] dan como resultado [7].

La reacción catódica puede analizarse en los siguientes términos:



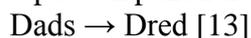
donde Dads indica un átomo de deuterio absorbido (en la superficie del cátodo). Dicho átomo se puede enlazar con una molécula de agua para dar:



desprendiéndose D, en el catodo. Las reacciones [10] y [11] dan como resultado la [8]. Los átomos adsorbidos en la superficie del cátodo pueden enlazarse entre sí y formar una molécula que se desprende:



o pueden penetrar en el metal:



Como consecuencia de las anteriores reacciones se desprende deuterio, D₂, en el cátodo y oxígeno, O₂, en el ánodo. Sobre el agua pesada se forma una mezcla que se denomina oxideuterio. Ambos D₂ y O₂ pueden reaccionar para formar agua pesada, esta reacción es fuertemente exotérmica pudiendo ser peligrosa si los volúmenes reaccionantes son altos. Por ello es conveniente dejar en la cubeta electroquímica escapes para el deuterio y el oxígeno. Esta práctica no es aconsejable si lo que se desea es medir la posible producción de energía durante la FF, ya que parte de la energía eléctrica proporcionada ha sido invertida en producir D₂ y O₂ y, por tanto, debe favorecerse su recombinación para mantener el balance energético.

En la fusión por gas el sistema experimental es como se describe en la fig. 4. En este tipo de experimentos se ha utilizado exclusivamente Ti en forma de esponja o virutas. El metal se calienta en una cámara en la que se hace vacío con objeto de limpiar su superficie. Seguidamente se introduce D₂ en la cámara y parte de él en el metal formando deuteruro de titanio. A continuación el sistema se enfría bruscamente a -200° C y, seguidamente, se deja calentar hasta la temperatura ambiente de forma natural. En estas etapas de enfriamiento calentamiento se produce la fusión nuclear.

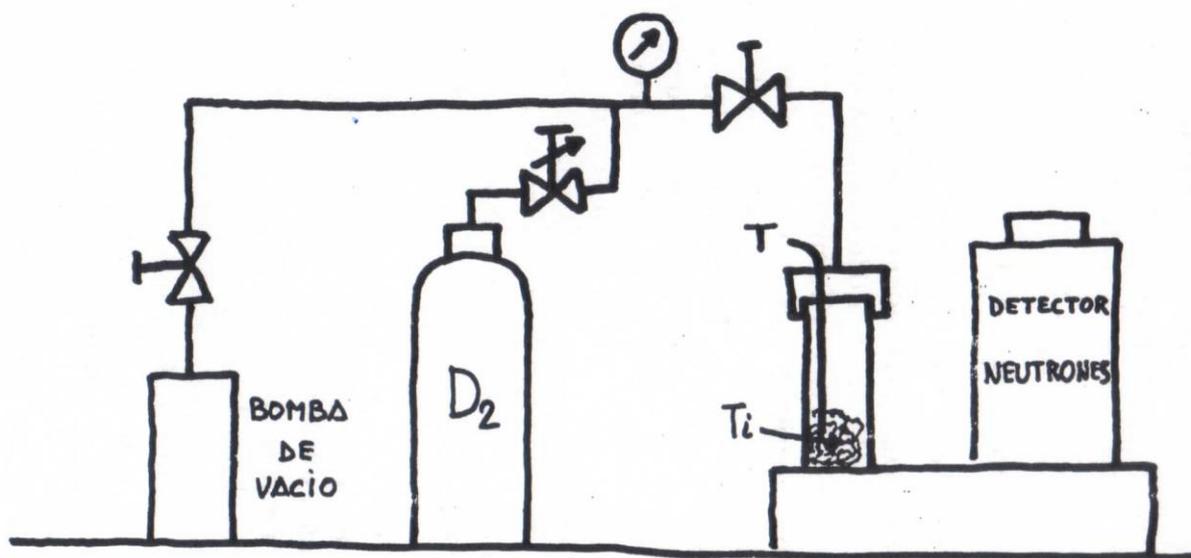
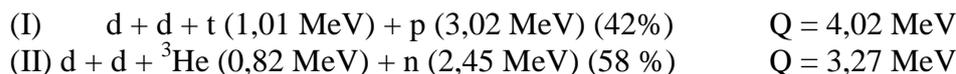


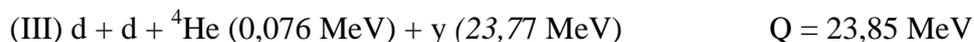
FIGURA 4

5.2. Productos nucleares de las reacciones de fusión

De acuerdo con los procedimientos experimentales seguidos las reacciones nucleares previsibles y que han sido propuestas como responsables de la FF. son:



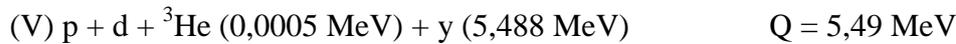
Reacciones que ya fueron expuestas anteriormente en esta lección pero que ahora es necesario recordar. Las respectivas probabilidades de I y II son 42 por 100 y 58 por 100, es decir, muy próximas. Es también posible aunque mucho menos probable la reacción.



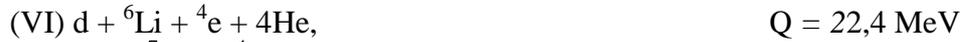
Dado que en el electrólito hay trítio (que además se produciría como consecuencia de la reacción I) es posible que también tengan lugar reacciones del tipo:



De igual forma no se debe excluir.



En aquellos casos en que se añadan al electrolito sales de Li son posibles las reacciones:



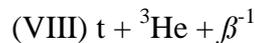
Sin embargo, y dado que el Li natural está formado por ${}^7\text{Li}$ en un 92,5 por 100, la reacción VII parece mucho más probable que la VI, y se producirían neutrones de $\sim 1,5 \text{ MeV}$.

Limitándonos a considerar los procesos más sencillos y probables es decir, las reacciones I y II exclusivamente, los subproductos de dichas reacciones serían:



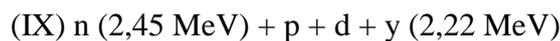
por lo que en un experimento en el que se desee probar la naturaleza nuclear de la reacción deben instalarse equipos de detección de n y/o protones y sistemas de medida de partículas α (He) y/o de t.

El tritio es un elemento radiactivo que se desintegra con una vida media de 12,7 años emitiendo un rayo β^{-1} (un e) con una energía máxima de 17,5 KeV que se distribuye entre las partículas resultantes de forma continua:



Para medir la concentración de tritio en un determinado sistema se emplea un contador de centelleo que mide los impulsos luminosos enviados por un líquido de centelleo que recibe la radiación β^{-1} . Diversos factores pueden reducir la calidad de las medidas de concentraciones de tritio: existencia de quimiluminiscencia (que normalmente se agota en tiempos de $\sim 1\text{h}$), influencias del PH etc. por lo que es necesario realizarlas y confirmarlas con el máximo rigor. En la fig. 5 se muestra el espectro de emisión del t en función de la energía de la radiación β producida.

Hay una gran variedad de equipos para detectar neutrones. Desde mi punto de vista esta técnica experimental es difícil y fácil cometer errores, ya que, en principio, los flujos neutrónicos a medir son muy bajos. Hay una forma indirecta de detectar la presencia de neutrones de 2,5 MeV y consiste en hacerlos pasar a través de moderadores de neutrones (medios con alto contenido protónico como la parafina y el agua natural) en los que se produce la reacción.



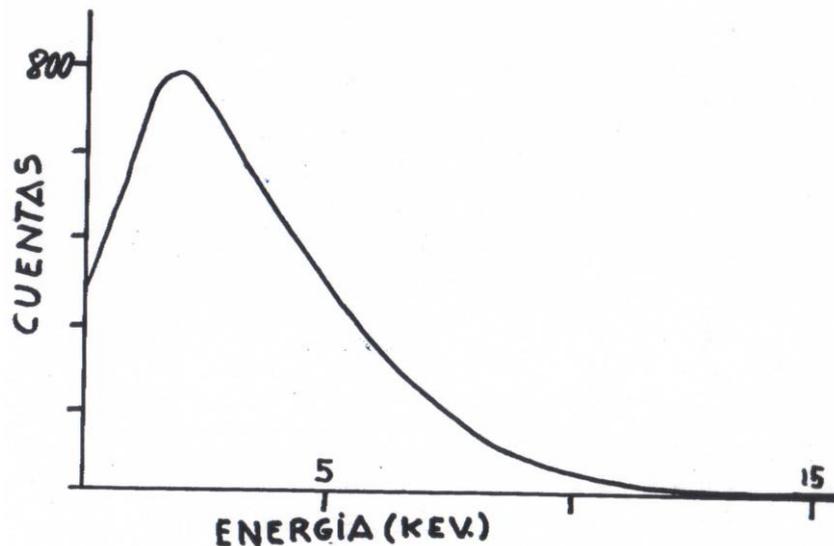


FIGURA 5

Pudiéndose detectar la radiación y así creada. Dos tipos de detectores de radiación y son de especial interés en nuestro contexto de Nal y de Ge. Los primeros presentan alta sensibilidad pero muy baja resolución y una importante deriva con la temperatura. Debido a su baja resolución la detección del pico y (2,22 MeV) es difícil por lo que la utilización de este equipo debe hacerse con máxima precaución. El detector de Ge presenta una mayor estabilidad con la temperatura y una mejor resolución (- 0,1% frente a ~ 6-7% de Nal lográndose resolver con nitidez el pico y de 2,22, siempre y cuando el flujo de radiación y no sea extremadamente bajo).

Los protones emitidos en la reacción I de aproximadamente 3 MeV se detectan con detectores de Silicio de barrera superficial (SSB) con gran eficiencia. La detección de ^4He se puede llevar a cabo mediante espectrometría de masas o detectores de radiación a de tipo semiconductor.

En la página siguiente se presenta un cuadro esquemático con el contenido de esta sección.

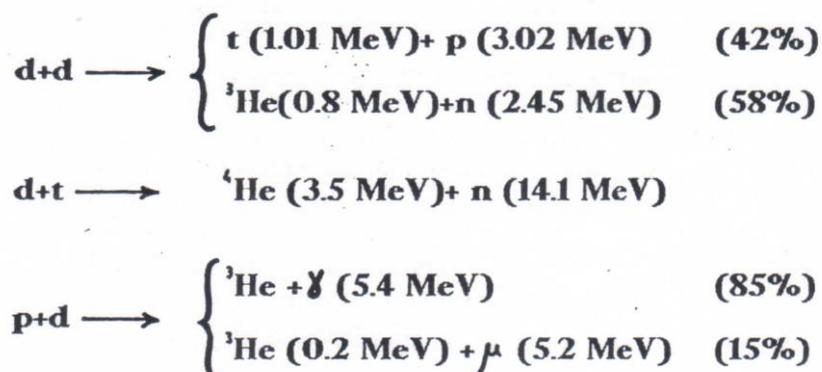
En resumen cabe decir que con las técnicas disponibles hoy día no parece posible detectar ritmos de fusión inferiores a $10\text{E}(-25)$ f.p.p.d/s, lo cual para 1 cm^3 de metal saturado de deuterones significa que tenga lugar una fusión cada 15 min en el cc citado.

5.3. Los primeros resultados experimentales

Nos referiremos en lo que sigue a los tres trabajos iniciales y de mayor impacto ²⁻⁴. Nos apoyaremos en información publicada en revistas o comunicada en congresos y prestaremos poca o ninguna atención a noticias de periódicos, telefax, etc.

El trabajo de Fleischmann, Pons y Hawkins² publica un conjunto de resultados, obtenidos con Pd, que a continuación resumimos:

"FUSIÓN FRÍA"
REACCIONES NUCLEARES PROPUESTAS



PARAMETRO A DETECTAR	TECNICA
Liberacion de Energia	Calorimetria (aumento de T)
Emision de Neutrones (2.45 MeV)	Detector de Neutrones (BF ₃)
Radiacion inducida en agua n+p→ d+γ (2.22 MeV)	Detectores (NaI,Ge) mono o multicanal
Presencia de tritio en el electrolito	Contador de centelleo
Presencia de ³ He en el electrodo	Espectrometria de masas

a) Experimentos calorimétricos o energéticos. Se generan unos 10 W por cc de electrodo de Pd de forma mantenida durante \square 120 h, lo cual implica una energía total de \square 4 MJ/cm³ (cantidad con la que podrían hervir unos 20l de agua). Esta energía liberada llega a ser hasta 10 veces la consumida en el experimento para producirla. Si esa energía se produjese como consecuencia de reacciones de fusión (d + d) sería necesario que tuvieran lugar:

$$20 \times 10^6 (13) \text{ f/cm}^3 \cdot \text{s} = 2 \times 10^9 (-9) \text{ f.p.p.d/s } 10 \text{ W/cm}^3$$

La energía producida depende acentuadamente de la densidad de corriente eléctrica utilizada y es proporcional al volumen del electrodo de Pd.

b) Fenómeno que tiene lugar en el volumen de los electrodos de Pd.

c) Detectan el pico de rayos γ producido en la reacción n + p (fig. 6). A partir de la intensidad de ese pico deducen que se han producido $\sim 4 \times 10^6$ n/s en una pieza cilíndrica de 0,4 cm de radio y 10 cm de altura. Por tanto, el n° de neutrones producido por cc. es de $\sim 10^6$ n/cm³.s.

Suponiendo que la reacción que tiene lugar es, otra vez, la fusión (d + d) y que se produce un n por reacción, la anterior cifra equivaldría a un ritmo de fusión de

$$\sim 10^6 (-18) \text{ f.p.p.d/s } \square 10^6 (4) \text{ f/cm}^3$$

d) Producción de tritio. De acuerdo con la reacción I del apartado anterior, si tiene lugar la fusión (d + d) debe obtenerse tritio como producto. Los autores muestran en su trabajo el espectro de

emisión de rayos β obtenido (fig. 7) y concluyen que en sus experimentos se originan $1-2 \times 10^4$ átomos de trítio por segundo que expresado en ritmo de fusiones:

$$- 10^4 \text{ f/cm}^3 \cdot \text{s} \approx 10^4 \text{ f.p.p.d/s}$$

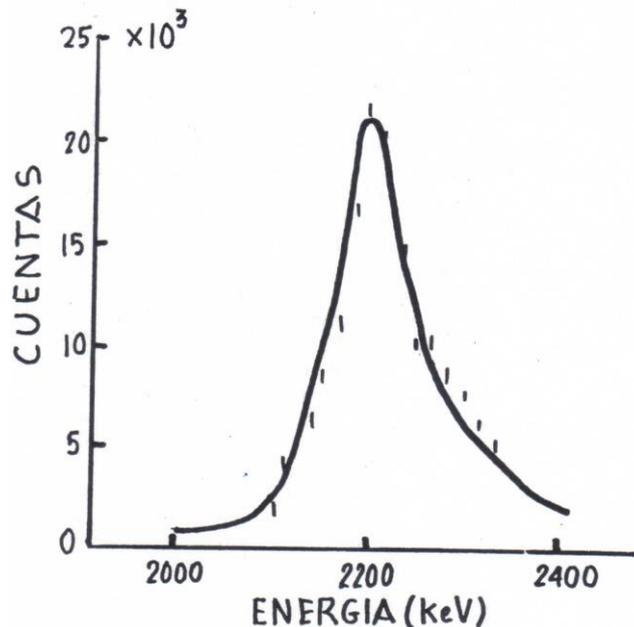


FIGURA 6

En conclusión:

En los resultados de Fleischmann, Pons y Hawkins hay una grave discordancia entre los ritmos de fusión necesarios para explicar la producción de energía y los que explican el flujo de neutrones y la creación de trítio. Estos son semejantes entre sí pero difieren de aquel en, aproximadamente, nueve órdenes de magnitud [10^9]. Esta discordancia es justificada por los autores diciendo que las reacciones (d + d) (I + II anteriores) son sólo parte del esquema que opera y que, por tanto, es necesario considerar otros procesos nucleares. Aunque los autores no indican los posibles ni analizan sus sugerencia.

Jones y sus colaboradores han trabajado tanto con Pd como con Ti. Sus resultados se centran sobre todo en la problemática nuclear, especialmente en la detección de neutrones. Con un espectrómetro, especialmente construido para sus experimentos, se obtuvo el resultado que aparece en la fig. 8, donde los canales en el eje horizontal corresponden a energía de neutrones. Se obtiene un máximo para energía de los neutrones de $\approx 2,5$ MeV, en acuerdo con lo previsto en la reacción II. Sus principales resultados son:

- a) Detectan la producción de neutrones de 2,5 MeV.
- b) Estiman el ritmo de producción de neutrones en las reacciones d + d a través de:

$$\text{f.p.p.d/s} = \frac{R/\epsilon}{\frac{M \times d}{2M}}$$

donde el ritmo de detección de neutrones es $R = (4,1 \pm 0,8) \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ la eficacia del sistema de detección, incluyendo los factores geométricos, es $E = (1.0 \pm 0.3)$ por 100; $M = 4 \times 10^{22}$ es el número de átomos en el cátodo de 3 g. de Ti empleado. La relación de pares de deuterones a iones de

Ti se toma la unidad, $d/2M = 1$, basados en que prácticamente todas las posiciones tetraédricas de la red de Ti estén ocupados por deuterones ($\gamma - Ti D_2$). En consecuencia el ritmo de la reacción de fusión es:

$$\sim 10E(-23) \text{ f.p.p.d/s} - 10E(-1) \text{ f/cm}^3.s$$

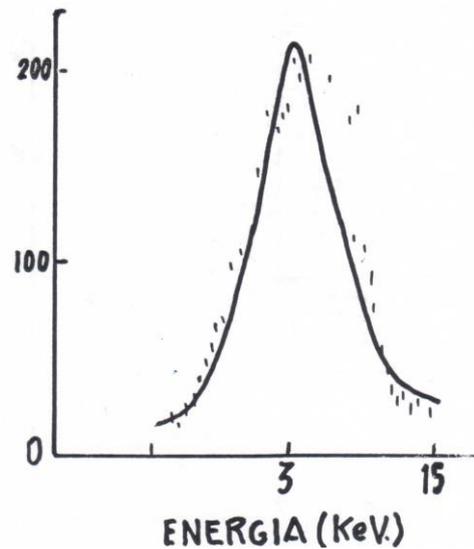


FIGURA 7

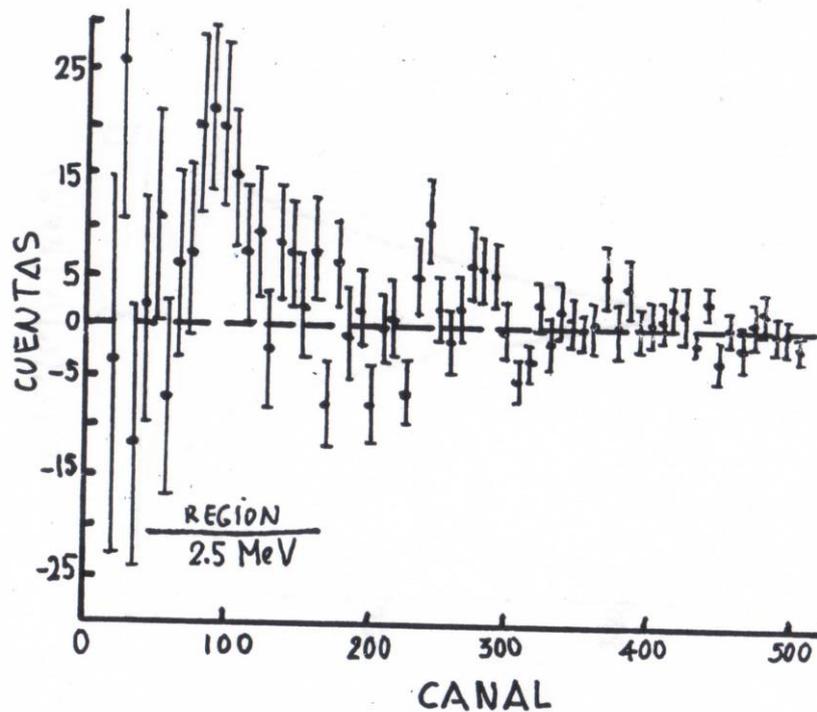


FIGURA 8

c) Concluyen los autores que la existencia de condiciones de no equilibrio en el metal es esencial para que se produzcan fusiones nucleares. La electrólisis es un procedimiento para lograr condiciones lejos del equilibrio. Sugieren como posible mecanismo para explicar el ritmo de fusión medido una acumulación de deuterones en imperfecciones de la red metálica, donde debido a la alta densidad se produciría una fusión «piezonuclear».

d) Destacan Jones y sus colaboradores la importancia del estado de la superficie del cátodo metálico.

El trabajo presentado por Scaramuzzi y sus colaboradores⁴ es vago, excesivamente cualitativo y con escaso contenido. Los autores se limitan, prácticamente, a dar unos datos experimentales mínimos sin discusión ni análisis. Los principales resultados de este trabajo son:

a) No se usa la electrólisis como procedimiento de carga del metal. Utilizan gas deuterio, y no D₂O, como fuente de deuterones. Con el fin de establecer un estado de no equilibrio, tal y como se había sugerido en³, se cambian los parámetros termodinámicos del sistema, especialmente temperatura y presión.

b) Los autores presentan resultados positivos (detección de neutrones producidos) obtenidos en los experimentos. Una vez el gas se ha introducido en la cámara con la muestra, el conjunto se enfría a temperatura de nitrógeno líquido (LN) donde se mantiene durante horas para luego dejar que se caliente de forma espontánea.

c) El número de cuentas del detector de neutrones en los dos experimentos fue de ~ 70 ch y ~1000 c/h, respectivamente, como media de todo el tiempo que duró la emisión (entre 10 y 40 h, extraordinariamente largas). Los valores anteriores deben compararse con el fondo, ~ 2 c/h. En la fig. 9 se puede ver una reproducción de uno de los registros presentados por los autores. El número de neutrones emitidos por la muestra de los experimentos es de ~ 350 n/s y ~ 5000 n/s, deducidos de los datos anteriores en c/h teniendo en cuenta la eficiencia del contador. Los anteriores datos se pueden expresar como ritmos de fusión (aceptando d + d) en la forma:

$$\begin{aligned} &\sim 2,3 \times 10^3 \text{ f/cm}^3 \cdot \text{s} \sim 2,3 \times 10^{19} \text{ f.p.p.d/s} \\ &\sim 158 \text{ f/cm}^3 \cdot \text{s} \sim 1,6 \times 10^{20} \text{ f.p.p.d/s} \end{aligned}$$

correspondientes al 2º y 1º experimentos respectivamente.

5.4. Resultados de los experimentos en la UAM

En el Departamento de Física Aplicada de la UAM de Madrid se han realizado diferentes experimentos enfocados a producir y detectar la FF. Se han empleado una técnica electrolítica semejante a la descrita anteriormente. Los primeros experimentos realizados fueron muy simples y con un utillaje y equipamiento posiblemente insuficientes para la dificultad del problema. Los medios disponibles y la calidad y rigor del propio experimento fueron mejorando en sucesivas pruebas, a lo largo de las cuales se fue produciendo un cambio de orientación en nuestro planteamiento. Los primeros ensayos se enfocaron como intentos de detectar energía producida. Los resultados fueron confusos y, en general, no se pueden considerar concluyentes. En cualquier caso, debemos decir que la instalación era excesivamente primitiva y que la interpretación de los datos dejaba siempre algunas dudas. De acuerdo con el sentir general, nuestro equipo pensaba en aquellos meses que las mediciones energéticas o de tipo calorimétrico no constituían una prueba suficiente de la existencia de procesos de fusión nuclear. Esta sólo se podía obtener a través de experimentos orientados a detectar alguno o algunos de los posibles productos nucleares que se crearán en reacciones de fusión. Con este criterio se organizó nuestro octavo experimento, calificado como ETI-6. La instalación se realizó de forma muy concienzuda y se pudo disponer, por primera vez en nuestro laboratorio, de equipos de contaje de neutrones, rayos γ y trítio gracias a la colaboración de diversos centros e instituciones. El experimento duró un mes y medio aproximadamente, y en él se obtuvieron los resultados que se expondrán a continuación. Como se ha dicho antes, el experimento E Ti-6 fue de tipo electrolítico. El cátodo que se empleó fue una pieza de Ti de 1,5X1,35 X 0,08 cm., y el ánodo una lámina de Pt de 2,5 x 2,5 x 0,05 cm. El D₂O empleado en el experimento procedía del CIEMAT y se añadieron, para formar el electrolito

final, una sal (Li_2SO_4) y diversas concentraciones de H_2SO_4 , con objeto de introducir variaciones en su pH. La superficie de la muestra se limpió mecánicamente (lijado y lavado con alcohol y acetona). El volumen total del electrolito fue de 75 ml. y se mantuvo constante mediante compensaciones de las pérdidas producidas por electrolisis y evaporación. Las corrientes aplicadas fueron sucesivamente crecientes hasta alcanzar unos 900 mA (equivalente a unos 450 mA/cm^2), valor que se mantuvo constante durante los dos tercios finales del experimento. Las diferencias de potencial entre ánodo y cátodo variaron según las corrientes deseadas y las condiciones (pH) del electrolito, estando comprendidas entre -5,0 y -10,0 V. Un electrodo de referencia ($\text{Hg/Hg}_2\text{SO}_4$) en una solución saturada de K_2SO_4 en D_2O permitía conocer en todo instante el potencial del cátodo de Ti. La instalación interna de la cubeta electrolítica se completaba con un termopar que en íntimo contacto con la muestra de Ti permitía conocer su temperatura en cada momento. Todas las variables electroquímicas (corrientes, potenciales) y térmicas (temperatura) se midieron y registraron continuamente durante el experimento.

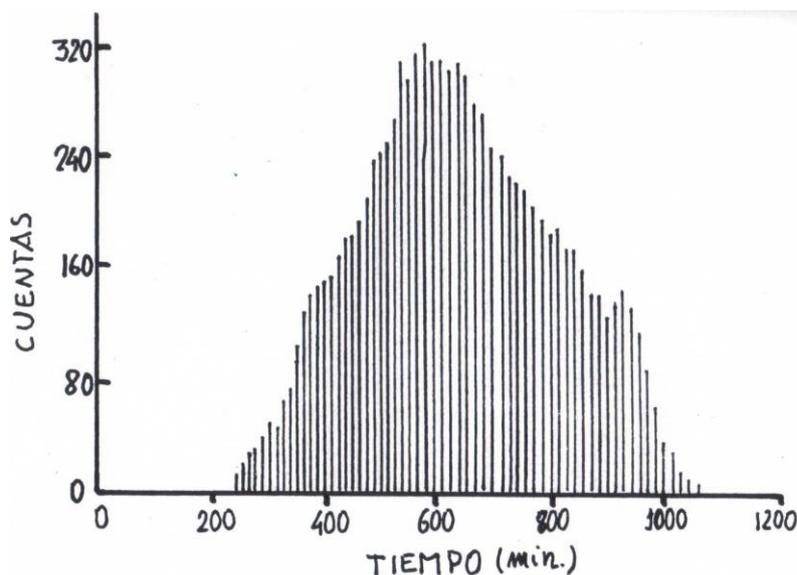


FIGURA 9

La cubeta electroquímica estaba rodeada de un baño térmico de agua natural a 30°C para cumplir dos objetivos: primero, que la temperatura del sistema experimental no estuviera sometida a las oscilaciones ambientales, y segundo, producir una conversión, de los posibles neutrones que se creasen, a radiación y mediante la reacción $n + p + d + \gamma$.

El equipo de detección nuclear estaba integrado por un contador de neutrones tipo BF3, que permitía conocer número pero no energía de neutrones, y dos detectores de radiación γ de NaI(Tl) , cuya resolución es del orden del 6 por 100. Las variaciones de la concentración de tritio se detectaban extrayendo muestras del electrolito y analizándolas como se indicó en el apartado anterior. Debemos destacar que nuestro equipamiento nuclear era mínimo y en algunos aspectos estábamos en el límite de la sensibilidad necesaria para este tipo de experimentos³⁶.

Un resumen de los resultados experimentales obtenidos en el citado experimento fue enviado para su publicación y ha sido aceptado en la revista *Solid State Communications*³⁷. Probablemente el día de la inauguración de este curso académico 1989-90, el correspondiente número de esa revista se encuentre ya en nuestras bibliotecas. A continuación exponemos los resultados experimentales más destacados obtenidos en nuestro laboratorio:

a) No parece que en el experimento E Ti-6 se produjeran cantidades apreciables de energía salvo aquellas explicables como causadas por efecto Joule de la corriente eléctrica a través de la cubeta electrolítica, si bien debemos recordar que este experimento no estaba diseñado para medir producción

de energía, sino productos nucleares. De hecho, nuestra cubeta permitía el escape a la atmósfera del D_2 (cátodo) y O_2 (ánodo) producidos, algo que en un experimento calorimétrico se debe evitar con objeto de provocar su recombinación y producir la devolución al sistema de la energía invertida en la electrólisis.

b) El volumen del electrolito se mantuvo constante compensando las pérdidas por electrólisis y evaporación. En la fig. 10 se han representado las cantidades añadidas en función del tiempo, donde los triángulos negros representan el volumen añadido en cada hora indicada y las aspas el volumen añadido de forma acumulada. En la pequeña figura interior se puede ver la representación de las pérdidas debidas exclusivamente a la evaporación del electrolito. A lo largo del experimento era necesario compensar las pérdidas totales a un ritmo prácticamente lineal con el tiempo del orden de 0,4 ml/h, de las cuales 0,1 ml/h era compensación de pérdidas por evaporación y el resto por electrólisis.

c) El contenido en tritio del electrolito se siguió a lo largo de todo el experimento y su variación se muestra en la parte superior de la fig. 11 (de la ref. 37), expresada en cuentas por minuto (cpm) del contador de centelleo. Se observa que se producen algunas subidas discontinuas (indicadas con flechas) de la concentración de tritio del electrolito y que desde el principio del experimento hasta la hora 700 hay un aumento global del \square 50 por 100. En la parte inferior de la misma figura se ha representado la variación de tritio en el electrolito de otro experimento, semejante al anterior pero realizado con Pd, en el cual no se produjo ningún síntoma de FF. Como se puede ver dentro de los límites de error experimental (\pm 10 por 100) no se produce variación en la concentración.

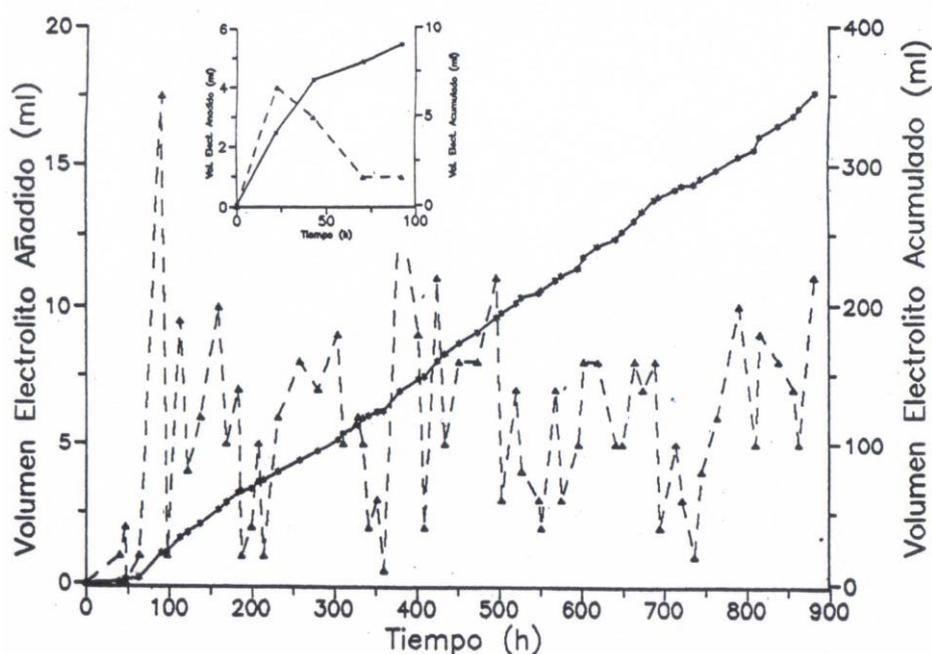


FIGURA 10

d) A lo largo del experimento se han detectado producciones de neutrones en cantidades superiores al flujo ambiental procedente de la radiación cósmica³⁸. Ese fondo ambiental daba origen a una señal en el contador de neutrones de 1-2 cuentas por hora (cph), en tanto las señales consideradas como significativas han estado comprendidas entre \sim 6 cph y 45.000 cph. En total se obtuvieron 25 registros de señales del contador de neutrones que se consideran positivas. En la fig. 12 (de la ref. 37) se muestran algunos de ellos. En la parte superior (a) de la figura se puede ver la señal producida por el detector cuando el único flujo neutrónico existente es el fondo ambiental equivalente a (1-2) cph, como media en tiempos suficientemente largos. Las partes (b), (c) y (d) son registros que consideramos positivos. En los (b) y (c) puede observarse que la emisión de neutrones se produce de una forma

esencialmente discontinua y semejante a ráfagas o «flashes». La duración total de la emisión ha variado de unas a otras entre □ 25 min. y □ 7 h. En el experimento y durante las emisiones de neutrones se realizaron diferentes pruebas para confirmar la veracidad de las detecciones y que no estábamos siendo «engañados» por algún error experimental. En la parte (d) de la figura se puede ver una de ellas: el contador de neutrones se alejó de la cuberta electrolítica durante unos minutos, tiempo durante el cual la señal del tector se hace cero, y al reintegrarlo a su posición cerca del experimento de nuevo la señal aparece.

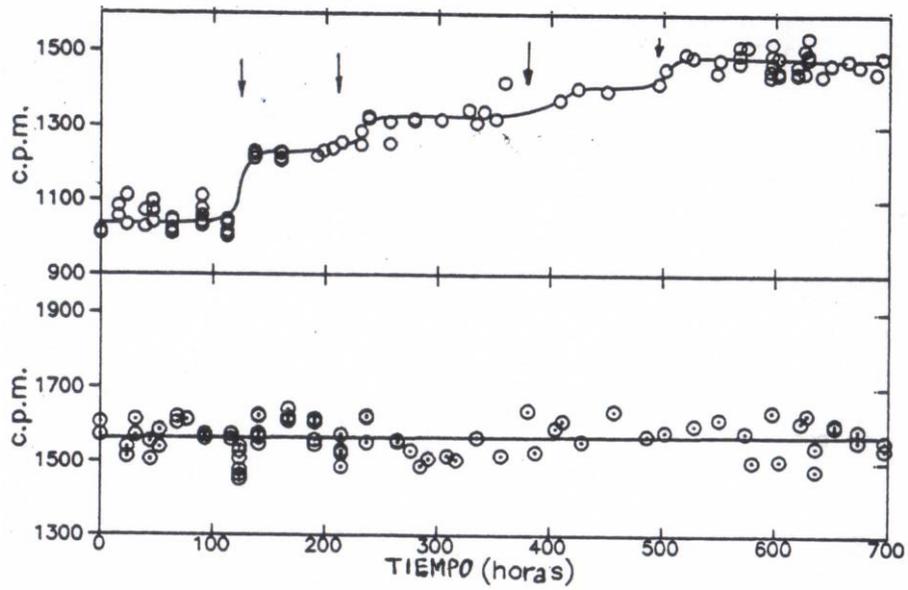


FIGURA 11

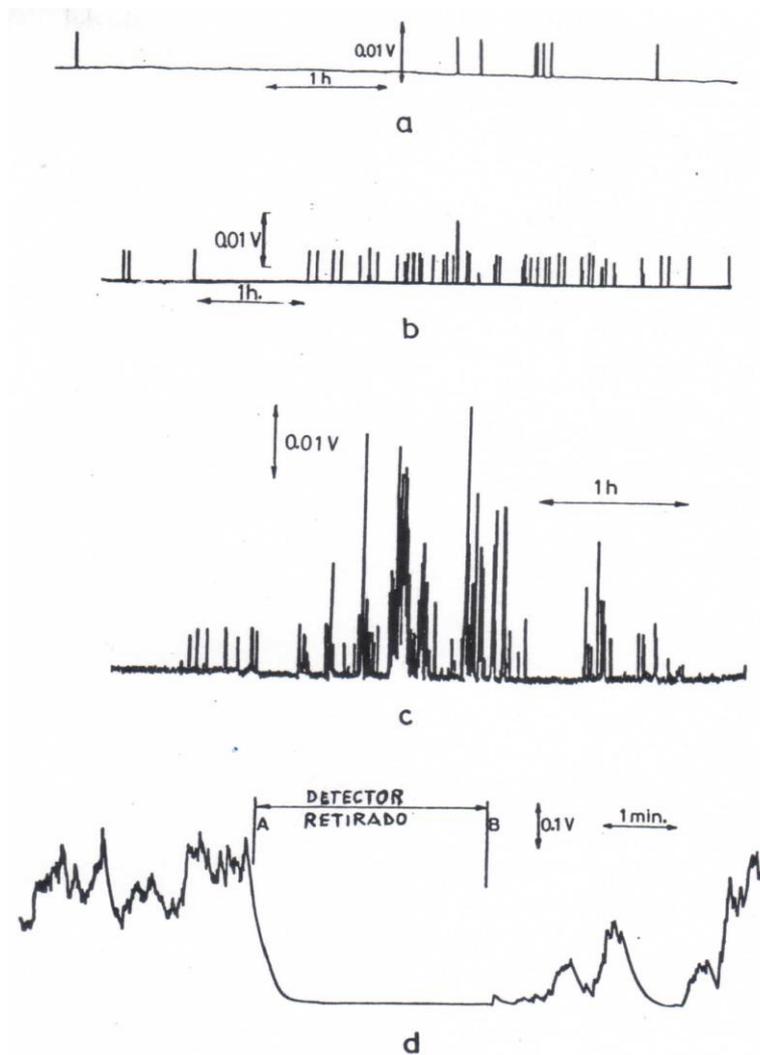


FIGURA 12

A partir de las características geométricas del experimento y de la del detector se ha calculado el número medio de neutrones emitidos por la muestra en cada una de las emisiones registradas. Los valores obtenidos fueron:

– En la emisión más intensa: $\square 13.4 \times 10E(4)$ n/s, equivalente (suponiendo reacción d + d) a:

$$\square 8,4 \times 10E(5) \text{ f/cm}^3 \cdot \text{s} = 8,4 \times 10E(-17) \text{ fppd/s}$$

y en la emisión más débil el flujo medio de neutrones detectado fue $\square 35 \times 10E(2) \text{ f/cm}^3 \cdot \text{s} = 1,35 \times 10E(-20) \text{ fppd/s}$. En la fig. 16 se comparan estas cifras con las obtenidas en los experimentos anteriormente descritos.

e) Los neutrones producidos pueden dar origen a rayos γ de 2,22 MeV si se hacen pasar por H_2O (reacción IX). En nuestro experimento creemos haber detectado la producción de dicha radiación γ . Ahora bien, dado que los detectores de NaI(Tl) tienen una resolución en el límite de la requerida por el pico de 2,22 MeV, es menos erróneo operar sobre el número de cuentas medidas por el detector en un determinado rango o ventana de energías. En la fig. 13 se presentan algunos resultados obtenidos, en forma de la media de la señal en el rango de energías 2,15-2,30 MeV en sucesivos intervalos de tiempo. El fondo ambiental corresponde a 15-16 cpm. Se destaca en la figura que entre la hora 96 y la 112 del experimento, la intensidad detectada fue de ~ 39 cpm, más de dos veces el fondo. Dicha señal más intensa coincide en el tiempo con un aumento discontinuo en el contenido de tritio und electrolito, tal y como reflejaba la fig. 11 y se reproduce en la 14 para la zona de tiempos de interés ahora. Esta coincidencia temporal de detección simultánea mediante dos variables distintas es, desde nuestro punto

de vista, unos de los argumentos más convincentes. Otro comportamiento semejante se presenta en la fig. 15: en la parte superior (a) el número de cuentas del detector de neutrones, y en la interior (b) el del detector de radiación y en dos rangos de energía diferentes, desde 2,0 a 2,3 MeV y desde 2,3 a 2,45 MeV. El incremento de radiación y detectada en la primera ventana de energía (donde debe situarse el pico de 2,22 MeV) se corresponde en el tiempo con el aumento en el número de cuentas de neutrones. Este paralelismo no se da con la radiación γ de 2,3 - 2,45 MeV. Las figuras anteriores proceden de la ref. 37.

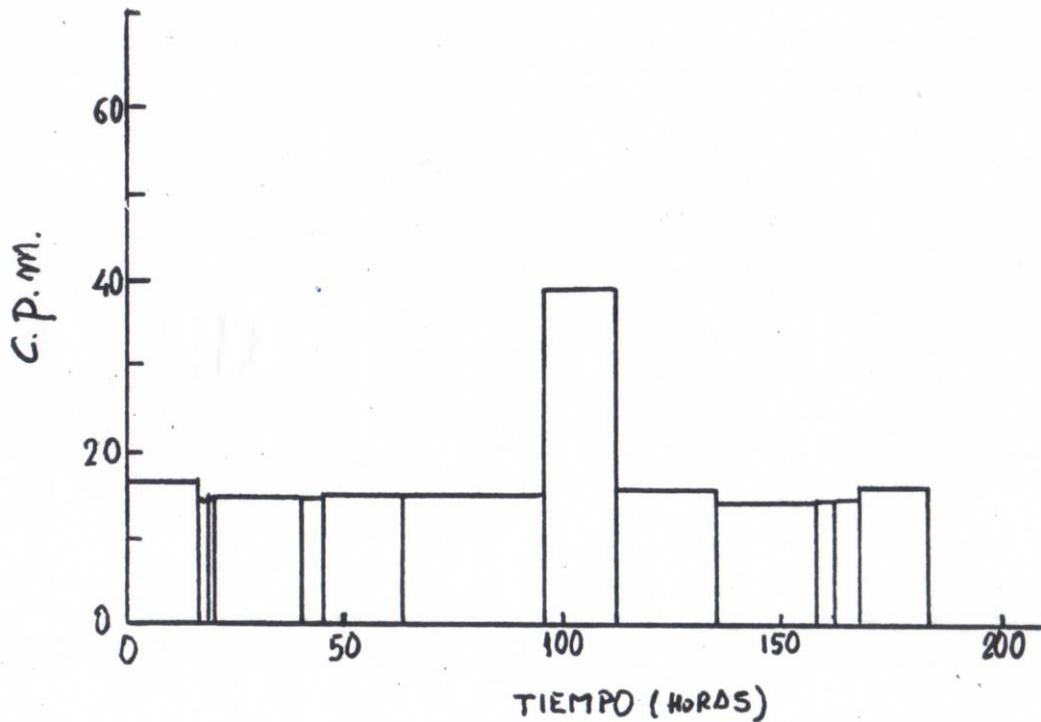


FIGURA 13

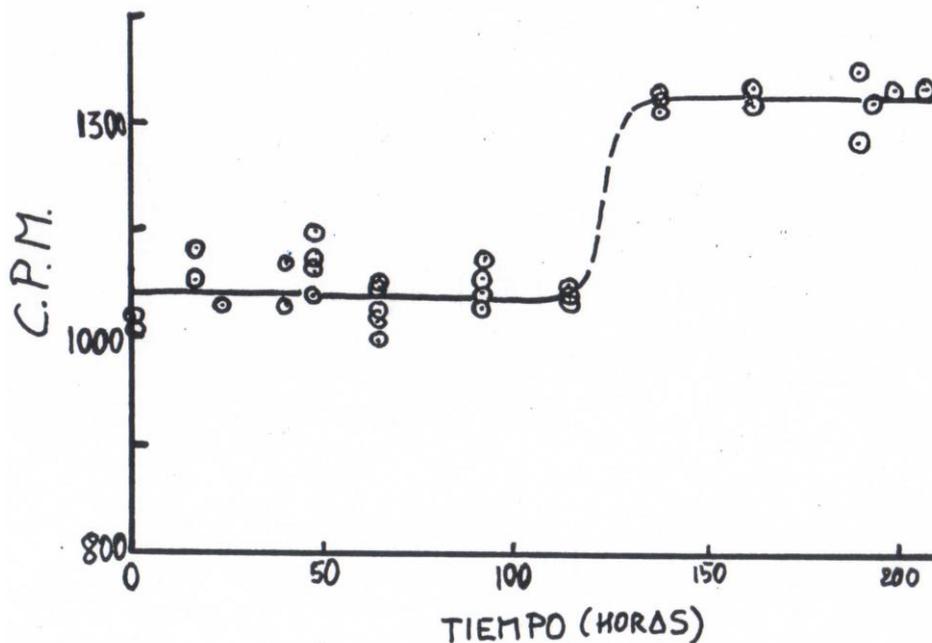


FIGURA 14

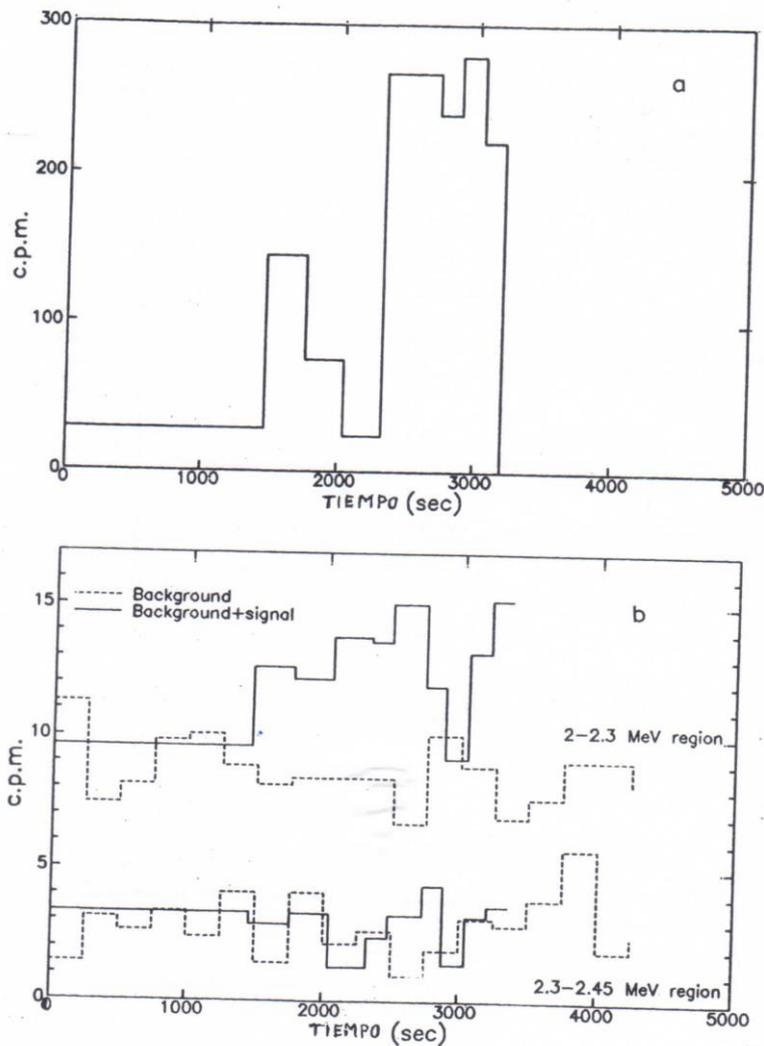


FIGURA 15

En resumen, podemos decir que se han detectado a lo largo del experimento ET1-6 variaciones significativas del flujo de neutrones, concentración de tritio y radiación inducida por los neutrones de 2,45 MeV. A lo largo del experimento se pudieron medir variaciones simultáneas significativas de los distintos parámetros. Con los valores experimentales obtenidos y contrastando con la reacción de fusión ($d + d$) se ha comprobado que el acuerdo numérico entre los parámetros neutrones y γ es bueno dentro de un factor cuatro, lo cual, dadas las imprecisiones que produce la geometría del sistema, puede considerarse razonable.

Finalizado el experimento ETi-6 a mediados de julio pasado, se inició en nuestro laboratorio uno nuevo que se mantuvo unos 20 días. Se introdujeron algunas modificaciones respecto al anterior, especialmente en relación con el tratamiento superficial de la muestra. No se detectó ningún indicio de haber producido fusión nuclear.

5.5. Resumen (posiblemente incompleto) de datos experimentales

Además de los resultados experimentales expuestos, se han publicado otros, por lo que es conveniente hacer un resumen de la situación presente. Como resultado de las investigaciones realizadas en meses pasados han aparecido algunas publicaciones y otras lo harán en las semanas venideras, por lo que este resumen resultará, sin duda, involuntariamente incompleto. Como todos ustedes sabrán, el tráfico de afirmaciones y negaciones, de resultados positivos y negativos, reales o supuestos, ha sido intenso en estos meses. Para evitar fomentar situaciones de ambigüedad o rumores

no fundamentados, parece oportuno aceptar algún criterio para componer este resumen. El tomado finalmente es: considerar sólo aquellos resultados que ya hayan sido publicados en revistas profesionales o que hayan sido aceptados para su publicación. Este criterio excluye todos aquellos trabajos y resultados (favorables o no) que hayan sido comunicados en alguno de los varios congresos celebrados¹. Esta decisión que es drástica está apoyada en el hecho constatado de que sólo una parte (generalmente no mayoritaria) de los resultados expuestos en congresos se publica posteriormente. El resto, bien por ser resultados provisionales, bien por haber sido obtenidos en forma improvisada, nunca ven la luz. Creemos que esta situación puede presentarse con mayor agudeza en este tema de la FF. dada la inseguridad que en torno a él existe.

Además de los trabajos ya citados y resumidos anteriormente²⁻³⁻⁴⁻³⁷ se han publicado (que yo tenga conocimiento de ello) los recogidos en las referencias³⁴⁻³⁹⁻⁴⁰⁻⁴¹, muy pocos, por tanto. De ellos, los citados en³⁴⁻⁴¹ contienen resultados negativos; los demás positivos de distinta naturaleza e intensidad. Los resumiremos dividiéndolos de acuerdo con la problemática energética o nuclear.

Energética

En varios de los trabajos citados se anuncia que no se ha medido la energía producida o que no se han detectado cantidades de energía significativas, pero sin dar más detalles que permitan calibrar la importancia de esas afirmaciones. En⁴¹, sin embargo, se hace un estudio a fondo del problema, con aportación de datos propios y un análisis minucioso de los resultados de Fleischmann, Pons y Hawkins². La conclusión alcanzada es negativa ya que aunque en los experimentos de Kreysa et al.⁴¹ se producen cantidades considerables de energía, los autores localizan su origen en procesos termoquímicos y catalíticos. En principio, por tanto, debemos concluir que no hay ninguna confirmación de los resultados energéticos de 2 que haya sido publicada (recuerden que he excluido de este análisis las comunicaciones a congresos).

Nuclear

El grupo (numerosísimo) de investigadores de la Comisión Nacional de Energía Atómica de Argentina³⁹ ha medido la producción de neutrones en un experimento electrolítico tanto de forma directa como a través de la radiación γ producida por los neutrones al atravesar un moderador. De sus resultados se deduce un ritmo medio de fusiones (d + d) de:

$$\sim 26 \text{ f/cm}^3\text{s} \sim 2,6 \times 10\text{E}(-21) \text{ fppd/s}$$

y un valor máximo del ritmo de:

$$\sim 100 \text{ f/cm}^3\text{s} \sim 1 \times 10\text{E}(-20) \text{ fppd/s}$$

Las mismas técnicas experimentadas se utilizaron en la Universidad de Dresden⁴⁰ obteniéndose ritmos de fusión de:

$$\sim 1,2 \times 10\text{E}(-2) \text{ f/cm}^3\text{s} \sim 1,2 \times 10\text{E}(-24) \text{ fppd/s}$$

En la fig. 16 se presentan todos los resultados positivos relativos a producción de neutrones que se han comentado en esta lección (como referencia se incluye el número de fusiones que sería necesario para justificar la producción de energía comunicada en². Hay que destacar que entre el mayor y el menor flujo de neutrones detectado hay una relación $7 \times 10\text{E}(7)$, cifra que no deja de ser sorprendente.

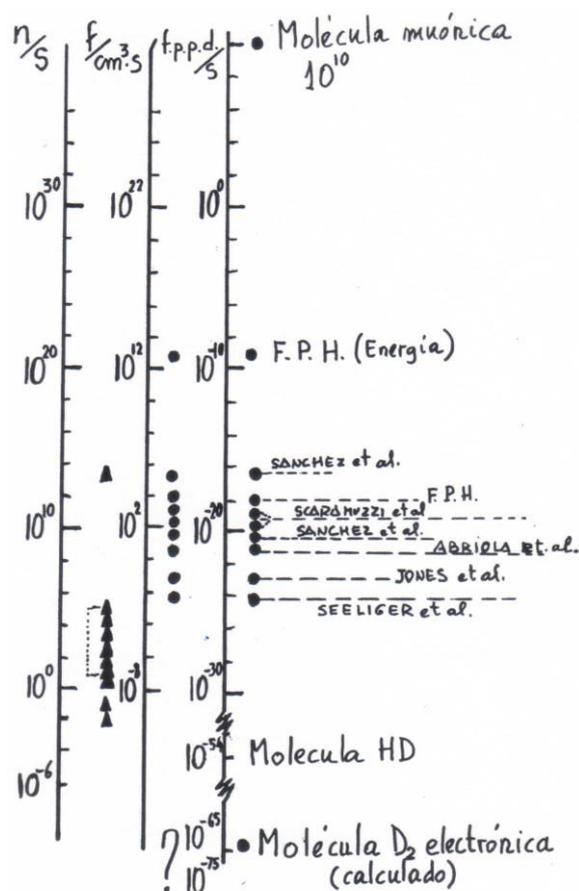


FIGURA 16

Los experimentos realizados en IBM (Yorktown Heights)³⁴ estaban enfocados a detectar los protones de 3 MeV producidos según la reacción I. El diseño del experimento es sumamente original y el número de experimentos, realizados con Pd, considerable. En todos los casos el número por cc. y por segundo medido era menor que 0,004. Los autores concluyen que esa cifra es indistinguible del fondo. Los experimentos de IBM son, en mi opinión, de corta duración (entre 24 y 250 h). Quizá estos resultados negativos fueran explicables bajo la hipótesis propuesta por Oppenheimer y Phillips¹⁴. Kreysa y sus colaboradores⁴¹ han presentado un trabajo excelente desde el punto de vista energético pero, en mi opinión, mucho más débil desde el punto de vista nuclear. Dicen no observar producción de neutrones pero no dan información numérica ni respecto al fondo ni respecto a los resultados de las medidas realizadas, por lo que no se puede hacer un análisis fundado de sus afirmaciones. También concluyen Kreysa et al. que la información proporcionada por el espectro y medido es negativa. Sin embargo, el análisis de sus propios datos, especialmente de la fig. 4 de su trabajo, es muy pobre.

Finalmente, debemos citar algunos trabajos en los que no se publican resultados de experimentos de FF., pero sí análisis y críticas de otros anteriores, en particular de los obtenidos por Fleischmann, Pons y Hawkins. Especialmente iluminador es el intercambio de correspondencia mantenido entre Fleischmann, Pons y Hoffman y Petraso y su equipo sobre la detección de radiación publicado en². Las correspondientes cartas se pueden ver en Nature⁴². En mi opinión, el análisis de Petraso et al. es muy sólido tanto en su primera como en su segunda carta, y la respuesta de Fleischmann, Pons y Hoffman es, cuando menos, desconcertante. Son también sumamente interesantes los trabajos⁴³ y ⁴⁴, sobre las medidas energéticas en²

Este resumen, como dije al principio, es incompleto. Quizá el día que se exponga esta lección pueda aportar les nueva y mayor información, ya que los próximos 15 y 16 de septiembre se celebra en Varenna (Italia) un congreso patrocinado por la EPS con el tema «Understanding the Cold Fusion Phenomena» (curiosa semejanza con el título de esta lección).

5.6. Las propuestas teóricas y de interpretación

Desde la perspectiva de posibles interpretaciones de los resultados experimentales la dificultad reside en explicar el mecanismo (o mecanismos) que daría origen a ritmos de fusión como los medidos (elevados, por tanto) a temperaturas tan bajas como la ambiente. En otras palabras, describir lo que ocurre en el metal para que el ritmo de fusión en él sea superior al que presenta una molécula D^2 + en unos 40 ó 50 órdenes de magnitud. La literatura existente es abundante (45-61) y contiene un elevado número de ideas y sugerencias que sin duda serán analizadas con detalle en un futuro inmediato. Aun así, adelantamos que por el momento no existe ninguna interpretación del fenómeno fusión fría que sea aceptada con generalidad.

La primera duda que sería conveniente reducir es, si la FF. tiene lugar en la superficie o en el interior del electrodo metálico, es decir, si es lo que los físicos y químicos llaman un fenómeno de superficie o de volumen. También en este terreno hay discrepancias entre los experimentales, aunque las opiniones expresadas no son muchas. Fleischmann y sus colaboradores concluían que era un fenómeno de volumen, ya que la intensidad del efecto que ellos detectaban variaba de forma aproximadamente proporcional al volumen de la muestra utilizada. Jones y su grupo se inclinaban a pensar que la FF. se producía en la superficie del sólido, aunque sus resultados están expresados respecto al volumen de las muestras. Bockris ha concluido recientemente que el gas desprendido en la electrólisis del agua pesada contenía elevadas concentraciones de tritio, por lo que deducía que la fusión ocurría en la superficie del electrodo. En cualquier caso, y en el momento presente, la información experimental existente no permite concluir sobre esas dos posibilidades y ni siquiera excluir que la FF. se pueda producir en ambos, superficie y volumen, simultánea o alternativamente, según las condiciones experimentales. Sin embargo, todos los intentos de interpretación que se han hecho hasta el momento aceptan la hipótesis de volumen. Desde esta perspectiva pueden considerarse dos vías de trabajo según la concepción que se haga del sólido metálico. Por un lado, en su forma ideal, como sólido perfecto: en este esquema se intenta comprender los efectos observados como producto o consecuencia de la influencia de los iones metálicos distribuidos regular y periódicamente en el sólido cristalino y de la carga de la nube electrónica que los rodea. En este contexto se ha hecho la mayoría de las aproximaciones al problema. Se trata de situaciones de equilibrio. En estas condiciones se han determinado los valores que tendrían que tener ciertos parámetros (constantes de apantallamiento, masa y carga efectiva del electrón, etc.) para que la aproximación de los deuterones alcanzase rangos (entre 0,002 y 0,007 Å) que permitieran explicar los ritmos de fusión medidos. Por desgracia, parece difícil que el comportamiento deseado de aquellos parámetros pueda darse en un sólido y, en cualquier caso, no se sabe cómo se podría dar. En este sentido quizá fuera deseable que se profundizase en el entendimiento de la alteración que sufre la estructura de bandas del sólido cuando se carga con una densidad elevada de deuterones.

Cerca del contexto anterior, aunque no en él, hay una segunda aproximación al problema que ha sido destacada por algunos autores, principalmente por Jones y Scaramuzzi. Se propone en ella considerar que la fusión se produce en situaciones de no equilibrio, es decir, no partiendo de las posiciones que los deuterones ocupan en la red metálica, sino de sus desplazamientos en ella. Los iones de deuterio son enormemente móviles en la red cristalina y se desplazan de una a otra posición de equilibrio. Podría ser durante estos desplazamientos cuando se produjese una aproximación suficiente entre deuterones y en consecuencia la fusión. En principio, la viabilidad de este mecanismo exigiría que se produjesen cambios bruscos en las trayectorias de los deuterones, lo que equivale a decir cambios en la dirección de la fuerza directriz. Se ha profundizado poco desde el punto de vista teórico y de cálculo en esta alternativa.

Finalmente, el último enfoque de nuestro análisis considera el sólido como algo real, por tanto imperfecto. Imperfecciones tales como dislocaciones, fronteras de grano, conglomerados de vacantes, grietas y microgrietas, etc., son lugares donde está demostrado que se acumulan iones de hidrógeno (y por tanto de deuterio) en grandes cantidades. Así, se ha comprobado que en conglomerados de

vacantes las concentraciones de iones pueden ser tales que den origen a presiones locales del orden de miles de atmósferas. Otros tipos de fenómenos que se producen en los defectos cristalinos pueden jugar papeles significativos; tal es el caso de campos eléctricos existentes en grietas y microgrietas que favorecerían la aproximación de los núcleos facilitando su posible fusión. Sin embargo, los primeros cálculos realizados rechazan esta posibilidad pues los campos eléctricos necesarios han de ser mucho mayores que los realmente existentes. Otra posibilidad interesante es la que se ha venido en llamar «fusión fría en caliente», gracias a la cual los deuterones se rían acelerados y al adquirir energías más altas mejoraría su ritmo de fusión. La idea más simple en este contexto es la que propone una zona microscópica, constituida por deuterio, y que se calienta gracias a la energía liberada en el colapso de una cavidad o conglomerado de vacantes de la red. Mediante este mecanismo no parece posible que se produzcan temperaturas superiores a 10 MeV (100.000° K).

En cualquier caso, no es mi propósito entrar en el detalle de esos mecanismos, pero sí comentaré brevemente un punto de vista negativo que algunos autores han lanzado sobre ellos: Se ha dicho que si el proceso de la FF. se realizará a través de imperfecciones en la red sólida, la FF. carecería de interés teórico, por ser un fenómeno que desde ese punto de vista no aportaría nada nuevo, y de perspectiva práctica por ser incontrolable. No creo razonable esta posición negativa por dos motivos: en primer lugar, no hay ninguna explicación detallada y, menos, completa de los posibles mecanismos de esos procesos en defectos, simplemente meras descripciones cualitativas en las que, a veces, no se aportan ni siquiera órdenes de magnitud. Y es que no se han dado anteriormente situaciones en las que una fusión tenga lugar en una cavidad sólida de dimensiones comprendidas entre 0,01 μm y 100 μm . En segundo lugar, debo decir que el estado de imperfección de un sólido es algo que hoy día sabemos y podemos controlar con cierta seguridad. De tal forma que considero factible crear un sólido con número y tipo de imperfecciones y defectos tales que la FF., de producirse en ellos, fuera regulable y controlable. Considero que los anteriores argumentos son suficientes para hacer meditar sobre la opinión, relativamente extendida, de que un fenómeno de «fusión fría en caliente» carecería de interés por tratarse de una fusión termonuclear en el interior de un sólido que está a temperatura ambiente.

6. COMENTARIO FINAL

Creo que es de justicia aceptar que la FF. es un hecho al que le falta una de las características fundamentales para ser reconocido como científico: la posibilidad de ser reproducido por distintos investigadores en diferentes laboratorios y países. La dificultad inherente a la reproducción de los resultados de los experimentos científicos es, en general, grande y no es infrecuente que los obtenidos por diferentes investigadores sean contradictorios. Pero ahora no hablamos de la reproducibilidad de resultados, sino de la verificación de la existencia de un fenómeno. Esta situación puede ser desalentadora y poco práctica. Desalentadora porque un considerable esfuerzo en horas de trabajo, en preparación delicada y cuidadosa de experimentos, en imaginación, puede acabar en la permanencia de las dudas. Y poco práctica porque el hecho de trabajar en este o aquel tema no constituye un mérito en sí mismo, y esto es preocupante para el investigador formado y para los jóvenes investigadores que han de construir se un currículum para afrontar su futuro académico, científico o profesional. Sin embargo, en esta situación nos animamos a seguir. Hay algunos motivos para ello (que no incluyen, obviamente, tendencias masoquistas). En primer lugar, no es ni intelectual ni científicamente aceptable dejar la situación como está, con un «esto no hay quien lo entienda». Deseamos saber los fundamentos de los comportamientos expuestos, queremos encontrar una explicación para los resultados contradictorios que hay sobre la mesa. Cabe la posibilidad de que al final lleguemos a la conclusión de que todo ha sido un cúmulo de errores y jugadas del azar. Si así fuera, lo aceptaríamos y desaparecerían nuestras dudas. Quedaríamos tranquilos. Pero no lo creo. Pienso que hay resultados rigurosos, obte nidos con seriedad y que detrás de ellos yace un enigma que hay que descifrar. Necesitamos comprenderlo. En segundo lugar, creo que, aunque es difícil, no es descartable, porque no hay demostraciones negativas suficientes, la posibilidad de obtener energía de la FF. Ese resquicio es tan importante para todos que justifica por sí solo nuestros esfuerzos.

7. AGRADECIMIENTOS

Parte del material utilizado en esta lección procede de los experimentos de FF. realizados en la UAM. Para llevarlos a cabo hemos contado con el apoyo económico de la FBE y la Secretaría General del Plan Nacional de Investigación Científica y Técnica y con el soporte técnico de CEDEX (MOPU), CIEMAT (MINER), IBM y el Departamento de Biología Molecular de la UAM. El equipo de investigación está formado por J. Sevilla, B. Escarpizo, F. J. Fernández y J. Cañizares.

8. APENDICES

Apéndice 8.1

Un átomo está constituido por el núcleo, con carga eléctrica positiva y la mayor parte de la masa total, y un conjunto de electrones a su alrededor cuya carga negativa global es de igual valor absoluto que la nuclear.

Las partículas integrantes del núcleo son los protones y neutrones, ambos de aproximadamente igual masa (unas 2.000 veces la del electrón). El neutrón es eléctricamente neutro y la carga del protón es positiva y de igual valor que la negativa del electrón.

Existen átomos que tienen el mismo *número atómico* (número de protones y, por tanto, carga eléctrica en el núcleo) pero distinta *masa atómica* (la de los protones y neutrones sumadas). Estos átomos se comportan de forma semejante en muchos aspectos físicos químicos y se denominan *isótopos*. De todos los átomos conocidos el de hidrógeno (H) es el más sencillo y ligero y presenta dos formas isotópicas: el deuterio (D) y el trítio (T). Los núcleos respectivos están formados:

- El de hidrógeno, por un protón (p).
- El de deuterio o deuterón por un protón (p) y un neutrón (n).
- El de trítio o tritón por un protón (p) y dos neutrones (n).

Los núcleos de los átomos se suelen representar por la fórmula química del átomo con un superíndice igual a la masa nuclear y el número atómico como subíndice. Por ejemplo:

- Núcleo de hidrógeno: ${}^1\text{H}$, o ${}^1\text{H}^+$ (protón).
- Núcleo de deuterio: ${}^2\text{H}_1$ o ${}^2\text{H}$ o D^+ etc.
- Núcleo de trítio: ${}^3\text{H}_1$ o ${}^3\text{H}$ o T^+ .

Los átomos forman entre sí combinaciones estables que denominamos moléculas. La molécula de hidrógeno está formada por dos átomos (H_2) y también la de Deuterio (D_2). Estas moléculas son los verdaderos componentes de los gases hidrógeno y deuterio.

El hidrógeno y el deuterio forman parte del agua ligera (H_2O) y del agua pesada (D_2O), respectivamente. Ambos isótopos se encuentran en el agua natural, del mar, etc., pero el hidrógeno es mucho más abundante que el deuterio y que el trítio.

Apéndice 8.2

La fusión nuclear es un fenómeno considerado inverso de la fisión nuclear. En ésta un núcleo pesado es dividido en otros más ligeros mediante bombardeo con alguna partícula nuclear. La razón que determina que la fusión nuclear tenga lugar entre núcleos ligeros y la fisión entre pesados es la siguiente: la cantidad de energía necesaria para mantener la cohesión entre los constituyentes (protones y neutrones) de un núcleo es diferente para los distintos núcleos. En los elementos de peso atómico medio esta energía expresada por nucleón es menor que en los pesados y ligeros, y a su vez, en estos

mayor que en aquellos. Por tanto, los procesos que tienen lugar de una manera más «espontánea» son, por un lado, la formación de núcleos medios a partir de ligeros (fusión) liberándose la diferencia de energías de enlace y, por otro, el fraccionamiento de un núcleo pesado en dos medios (fisión) con igual resultado.

Apéndice 8.3

Algunas unidades comunes de energía son el Kilovatio-hora (KW.h), la caloría (cal.) o la kilocaloría (Kcal.). De uso menos frecuente son el ergio (erg.), el julio (Jul.) y el electrón voltio (eV) o el magaelectrón voltio (MeV = 1.000.000 de eV.). Situadas de mayor a menor estas unidades forman la siguiente secuencia:

$$\text{KwH} > \text{cal} > \text{Jul.} > \text{erg.} > \text{Mev} > \text{eV}$$

y las equivalencias entre ellas son:

$$1 \text{ Kw.h} = 3,6 \times 10^6 \text{ Jul.} = 850.000 \text{ cal.} = 850 \text{ Kcal} - 1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-6} \text{ erg.} = 1,6 \times 10^{-13} \text{ Jul.} = 3,3 \times 10^{-14} \text{ cal.}$$

Apéndice 8.4

Las unidades comunes para medir longitudes son el metro (m), el centímetro (cm) y el milímetro (mm). En física atómica y nuclear se utilizan otras unidades mucho más pequeñas: el Angstrom (Å), el fermi (fm) y, en ocasiones la micra o micrómetro (μm) y el nanómetro (nm). Las equivalencias entre esas unidades son:

$$1 \text{ m} = 10^2 \text{ cm} = 10^3 \text{ mm} = 10^6 \mu\text{m} = 10^9 \text{ nm} = 10^{10} \text{ Å} = 10^{15} \text{ fm.}$$

Por tanto:

$$1 \text{ Å} = 10^{-8} \text{ cm} = 10^{-10} \text{ m} \quad 1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm} = 10^{-15} \text{ m}$$

Apéndice 8.5

El Pd es un metal cúbico centrado en las caras (fcc) de constante de la red 3.891 Å. Cuando absorbe hidrógeno (o deuterio) a temperatura ambiente sufre una deformación homogénea y su constante de red aumenta, pasando a ser 3.894 Å, si la cantidad de H₂, o D₂ absorbida es de 0,025 — 0,030 átomos por uno de Pd, correspondiente a la fase α . Si son absorbidas cantidades mayores se forma la fase β que convive con la α . Se mantiene la estructura fcc. de la red metálica original, pero se produce un cambio discontinuo del parámetro de red (transición de fase de primer orden) que pasa a tomar el valor de 4.026 Å. Ese cambio de fase se produce a una concentración atómica de hidrógeno o deuterio del 0,60 (60 núcleos de deuterio por cada 100 iones de Pd) con los iones de H o D situados en posiciones intersticiales octaédricas de la red. Cuando la concentración de H o D es estequiométrica (PdH, PdD), es decir, 1, todas las posiciones octaédricas están ocupadas y aparece la estructura real del tipo cloruro sódico.

A temperaturas elevadas el Ti acepta elevadas concentraciones de hidrógeno o deuterio (9X 10²² hidrógenos o deuterios por cc). La fase del Ti hexagonal compacto (altas temperaturas) admite concentraciones del hidrógeno o deuterio de hasta el 10 por 100. Un aumento de concentración de H o D da origen a la fase α de hidrógeno (deuterio) en la fase β (cúbica centrada en el cuerpo, bcc) del Ti a alta temperatura. Si se aumenta la concentración de H hasta un 40 por 100 se logra estabilizar la fase B a temperatura 600° K inferior de lo normal. Otro aumento en la concentración de H o D resulta en otra región de esas fases (β y γ) una red metálica fcc con los hidrógenos en posiciones intersticiales tetraédricas de la red. La composición estequiométrica (TiD₂).

9. REFERENCIAS

- 1 Congresos sobre F.F. celebrados: Baltimore (EE.UU.). A.P.S., 1-2 mayo 1989; Los Angeles (EE.UU.), E. Society, 8 Mayo 1989; Santa Fe (EE.UU.), L.A.N.L., 23-25 Mayo 1989; Montpellier (Francia), J.d'E., 31 Mayo 1989; «Cold Fusion in the European Community», 2nd. Meeting, A.E.A. - Harwell (U.K.), 31 Mayo 1989.
- 2 M. Fleischmann y S. Pons, *J. Electroanal. Chem.* 261, 301-308 (1989); y fe de erratas en *J. Electroanal. Chem.* 263, 187-188 (1989). Es de destacar que la primera de las erratas que reconocen Fleischmann y Pons es haber omitido inadvertidamente al tercer autor (hombre): M. Hawkins.
- 3 S. E. Jones, E. P. Palmer, J. B. Czirr, D. L. Decker, G. L. Jensen, J. M. Thorne, S. F. Taylor y J. Rafelski, *Nature*, 338, 737-740 (1989).
- 4 A. De Ninno, A. Frattolillo, G. Lollobattista, L. Martinis, M. Mar tone, L. Mori, S. Podda y F. Sacaramuzzi, *Europhys. Lett.* 9 (3), 221-224 (1989).
- 5 «Cold Confusionp es una expresión acuñada en *Nature* y usada para reflejar la situación presente.
- 6 M. Withers, «Unclear Fusion», *Education in Chemistry*, julio 1989, 102-103.
- 7 El Dr. D.R.O. Morrison del CERN persigue demostrar que la F.F. es un fenómeno que se debe incluir en la «Ciencia Patológica» que lanzó Langmuir.
- 8 «In business, Cold fusion is hot», *Research and Development*, julio 1989, pág. 5.
- 9 H. Semat, *Física Atómica y Nuclear*. Aguilar (Madrid) 1971, pág. 400.
- 10 F. C. Frank, *Nature* 160, 525 (1947).
- 11 A. D. Sakharov, Report of the P. N. Lebedev Inst. Moscu (1948).
- 12 L. W. Alvarez, Discurso de recepción del Premio Nobel (1948).
- 13 P. Paolo, *Nature*, 338, 71 (1989).
- 14 I. R. Oppenheimer, Y. M. Phillips, *Phys. Rev.* 48, 500 (1935).
- 15 J. Rafelski y S. E. Jones, *Scientific American* 257, 84 (julio 1987).
- 16 N. H. March, W. H. Young y S. Sampanthar, «The many body problem in Quantum Mechanics», Cambridge. U.P.
- 17 J. M. Ziman, «Introduction to Solid State Physics».
- 18 F. J. Yndurain, «Mecánica Cuántica», Alianza Universidad, Madrid (1988)
- 19 W. Harrison, «Pseudopotentials in the Theory of Metals» Benja min, N. Y. (1966).
- 20 P. Egelstaff, «An Introduction to the liquid State», A. P. Londres (1970).
- 21 R. Kippenhahn, «Cien mil millones de soles» Salvat, Barcelona (1984).
- 22 F. Paneth y K. Peters, *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, 59, 2039 (1926).
- 23 F. Paneth y K. Peters, *Die Naturwissenschaften*, 43, 956 (1926).
- 24 F. Paneth y K. Peters, *Berichte der Deutschen Chemischen Gesill Schaft* 60, 808 (1927).
- 25 F. Paneth. *Die Naturwissenschaften* 16, 379 (1927).
- 26 F. Paneth, *Nature*, 119, 706 (1927).
- 27 S. E. Koonin y M. Nauernberg. «Cold fusion in isotopic hydrogen molecules», enviado para publicar en *Nature* (1989).
- 28 Ya. B. Zel'dovich y S. S. Gershtein, *Soviet Physics Uspekhi* 3, 593 (1961).
- 29 C. D. Van Siden y S. E. Jones, *Journal of Physics G12*, 213 (1986).
- 30 J. D. Jackson, *Phys. Review* 106, 330 (1957).
- 31 S. E. Jones A. N. Anderson, A. J. Caffrey, J. B. Walter, K. D. Watts, J. N. Bradbury, PAM Gram, M. Leon, H. R. Maltrud y M. A. Paciotti, *Phys. Rev. Lett.* 51, 1757 (1983).
- 32 S. E. Jones, *Nature*, 321, 127 (1986).
- 33 J. Rafelski and S. E. Jones, *Scientific American* 257, 84, (Julio 1987).
- 34 J. F. Ziegler, T. H. Zabel, J. J. Cuomo, V. A. Brusica, G. S. Cargill, III, E. J. O'Sullivan y A. D. Marwick, *Phys. Rev. Letters*, 62, 2929 (1989).
- 35 «Hydrogen in Metals » I y II, Edit: G. Alefeld y J. Völkl, Springer Verlag, Berlin (1978).
- 36 C. Sánchez, «Fusión Fría: ¿Dificultades en la detección o falta de reproducibilidad del fenómeno», *Política científica*, junio 1989, 40-42.

- 37 C. Sánchez, J. Sevilla, B. Escarpizo, F. Fernández y I. Cañizares, «Nuclear product detection during electrolysis of heavy water with Ti and Pt electrodes » aceptado para publicación en *Solid Stat. Comm.* (1989).
- 38 J. F. Ziegler, *Nuclear Inst. Methods*, 191, 419-424 (1981).
- 39 D. Abriola y otros 26 autores, *J. E. Electroanal. Chem.* 265, 355-360 (1989). (Sé que no es costumbre omitir los nombres de los autores y pido disculpas por hacerlo. Pero estarán de acuerdo conmigo en que ya quisieran algunos escritos reivindicativos tener un soporte en firmas tan fuerte como este trabajo).
- 40 D. Seeliger, K. Wiesener, A. Meister, H. Marten, D. Ohms, D. Rahner, R. Schwierz y P. Wustner, *Electrochimica Acta*, 34, 991-993 (1989).
- 41 G. Kreysa, G. Marx y W. Plieth, *J. Electroanal. Chem.* 266, 437-450 (1989).
- 42 R. D. Petrasso, X. Chen, K. W. Wenzel, R. R. Parker, C. K. Li y C. Fiere, *Nature*, 339, 183-185 (1989); M. Fleischmann, S. Pons y R. J. Hoffman, *Nature*, 339, 667 (1989); Petrasso et al. *Nature*, 339, 667-669 (1989).
- 43 M. Keddad, *Electrochimica Acta*, 34, 995-997 (1989).
- 44 G. Horanyim *Electrochimica Acta*, 34, 889-890 (1989).
- 45 J. Rafelski, M. Gajda, D. Harley y S. E. Jones, «Limits on Cold Fusion in Condensed Matter: a Parametric Study», preprint (1989).
- 46 D. Harley, M. Gajda y J. Rafelski, «Review of the current theoretical Status of Cold Fusión», preprint (1989).
- 47 T. Greenland, *Physics World*, Mayo 1989, p. 16-17.
- 48 S. E. Koonin y M. Nawenberg, «Cold Fusion in isotopic hydrogen molecules» preprint (1989).
- 49 J. S. Cohen y J. D. Davies, *Nature*, 338, 705-707 (1989).
- 50 R. Seitz, *Nature*, 339, 185 (1989).
- 51 W. Schommers y C. Politis, «Cold Fusion in condensed Matter: is a theoretical description in terms of usual solid State physics possible?» *Modern Phys. Lett.* 83, 597 (1989).
- 52 G. L. Show, R. W. Bland, L. Fonda, H. S. Martis, H. G. Pugh, M. Shin y R. Slansky, «Scenario for energy production form cold fusion by free quark catalysis», preprint.
- 53 A. Dar, «Cosmic Ray induced cold nuclear fusion in condensed Matter?» enviado a *Phys. Rev. Letter* (1989).
- 54 P. L. Hagelstein, «Phonon in interactions in coherent fusion», A simple model for coherent DD fusion in the presence of a Lattice»; «Dephasing in coherent DD fusion and the long chain model», «Rates for neutrons and tritium productions in coherent DD fusion».
- 55 J. Gittus y J. Bockris, *Nature*, 339, 105 (1989).
- 56 L. Pauling, *Nature*, 339, 105 (1989).
- 57 S. E. Koonin, «Enhancement of Cold fusion rates by fluctuations», enviado a *Phys. Rev. Lett.*
- 58 T. Tajima, H. Iyetomi y S. Ichimaru, «Influence of attractive interactions between deuterons in Pd on nuclear fusion» preprint (1989).
- 59 A. J. Leggett y G. Baym, *Phys. Rev. Lett.* 63, 191 (1989).
- 60 Z. Sun y D. Tomanek, *Phys. Rev. Lett.* 63 59 (1989).
- 61 N. R. Arista y A. Gras-Marti, «Screening effects in nuclear fusion of hydrogen isotopes in dense media» enviado a *Phys. Rev. A.* (1989).

¿UN TEMA CERRADO?

Anexo de actualización sobre la Lección inaugural (Septiembre 2022)

Carlos Sanchez López

Catedrático Emérito de Física de Materiales de la UAM

El entusiasmo por la F.F. (fusión fría) o FNF (fusión nuclear fría) se despertó en los años 90 del siglo pasado y permaneció durante casi veinte años. En la actualidad, el número de investigaciones en curso relativas al tema mencionado es reducido.

Desde un punto de vista personal, creo que las investigaciones en F.F. encontraron una gran resistencia y oposición por buena parte de la comunidad científica afín al tema “fusión nuclear”, digamos, convencional o “fusión termonuclear”.

¿Por qué los investigadores en F.F. no alcanzamos el objetivo perseguido: demostrar la realidad del fenómeno?. Seguramente no hay una sola respuesta a esta pregunta y las posibles se moverán en un arco muy amplio: desde la negación de la realidad y existencia del fenómeno... Mi punto de vista personal como investigador en el campo es que no fuimos capaces de determinar los factores que aseguraban la reproducibilidad de los resultados experimentales. El control y la reproducibilidad de los resultados es una condición que debe cumplirse en la realización de experimentos (en el conjunto de las Ciencias Experimentales). Para conseguir la reproducibilidad de los resultados experimentales se requiere llegar a un exhaustivo conocimiento del comportamiento de aquellos factores (variables) que juegan un papel, a veces importante, a veces mínimos, en el desarrollo del fenómeno que se está investigando. La reproducibilidad de los experimentos con obtención de iguales resultados en distintos laboratorios de investigación ha sido siempre y es un problema real [1], menos agudo cuando se investiga en materias más o menos convencionales que cuando se hace en temas no convencionales como es la F.F. Mi opinión personal es que los investigadores en F.F. nos vimos envueltos en esa problemática y no supimos establecer con claridad las condiciones experimentales que aseguraban la reproducibilidad de los resultados característicos del fenómeno.

Desde otro punto de vista, recientes investigaciones [2] y opiniones expresadas por sobresalientes científicos [3] apuntan en la dirección de que en los experimentos de F.F. queda “algo por descubrir”. Ese es también mi punto de vista actual.

Madrid, septiembre 2022

Carlos Sánchez López

1. Carlos Morales, L.S., Carlos Sánchez., *The Reproducibility Crisis in Science from the Perspective of Thin Film Deposition: An Unexpected Approach*. Mod Concept Material Sci. , 2020. **3**(3): p. 1-4.
2. Berlinguette, C.P., et al., *Revisiting the cold case of cold fusion*. Nature, 2019. **570**(7759): p. 45-51.
3. Leggett, A.J., *Matchmaking Between Condensed Matter and Quantum Foundations, and Other Stories: My Six Decades in Physics*. Annual Review of Condensed Matter Physics, 2020. **11**(1): p. 1-16.