



© Fondo de Cultura Económica

LA GRAN ILUSIÓN IV. LA FUSIÓN FRÍA

Autor: JORGE FLORES VALDÉS / ARTURO MENCHACA ROCHA

- [COMITÉ DE SELECCIÓN](#)
 - [EDICIONES](#)
 - [DEDICATORIA](#)
 - [AGRADECIMIENTOS](#)
 - [PREFACIO](#)
 - [NOTA INTRODUCTORIA](#)
 - [I. UN EXPERIMENTO FRUSTRADO](#)
 - [II. LA FÍSICA Y LA QUÍMICA DEL SIGLO XIX](#)
 - [III. EL ELECTRÓN, LA RADIOACTIVIDAD Y EL NÚCLEO](#)
 - [IV. LA MECÁNICA CUÁNTICA](#)
 - [V. EL NÚCLEO Y SUS FUERZAS](#)
 - [VI. A MANERA DE RESUMEN](#)
 - [VII. CÓMO DETECTAR LA RADIACIÓN](#)
 - [VIII. LA FUSIÓN NUCLEAR](#)
 - [IX. LA FUSIÓN CALIENTE: LOGROS Y DIFICULTADES](#)
 - [X. OPERACIÓN DE TOKAMAK](#)
 - [XI. LA FUSIÓN FRÍA ANTES DE 1989](#)
 - [XII. ENCENDEDORES Y CELDAS ELECTRÓNICOS](#)
 - [XIII. CRÓNICA DE UNA ILUSIÓN FALLIDA](#)
 - [XIV. CRÍTICAS DEVASTADORAS](#)
 - [XV. MORALEJA DE UN EXPERIMENTO FRUSTRADO](#)
 - [COLOFÓN](#)
 - [CONTRAPORTADA](#)
-



COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores

Dr. Leopoldo García Colín

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Guillermo Haro †

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Emilio Rosenblueth †

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora Fundadora:

Física Alejandra Jaidar †

Coordinadora:

María del Carmen Farías



EDICIONES

Primera edición, 1992

Primera reimpresión, 1995

La Ciencia desde México es proyecto y propiedad del Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica de la SEP y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D. R. © 1992, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA; S. A. DE C. V.

D. R. © 1995, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Carretera Picacho-Ajusco 227; 14200 México, D.F.

ISBN 968-16-3946-4

Impreso en México



DEDICATORIA

A MARIELLE

y

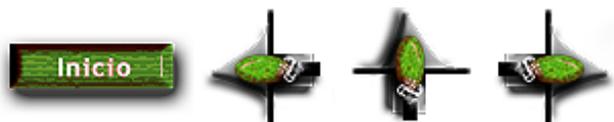
A PAULA, ARTURO, ALEJANDRA Y NURIA



AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen los útiles comentarios de José Luis Mateos, María Esther Brandan, Aurora Marrón y Jorge Flores Espinosa, que contribuyeron a mejorar el texto.

Reconocen también a Maricela Barrera, Carmen González, Juan Manuel Álvarez Tostado y Antonio García Zenteno su labor para levantar la tipografía de este libro.



PREFACIO

En la historia reciente de la física, y con toda seguridad en muchas otras ramas y tiempos de la ciencia, hallamos ejemplos de objetos elusivos, que no se dejan ver. Se tiene, por un lado, una teoría física bien establecida como la mecánica cuántica, digamos, que predice una serie de hechos que podrían ser observados. Si estos hechos se descubrieran experimentalmente la teoría, ya comprobada en otras situaciones, recibiría una confirmación más y conquistaría otra isla firme del conocimiento, plataforma segura para dar luego un paso más hacia adelante. Por el contrario, no poder verificarlos podría echar por tierra el esquema teórico, o al menos retrasar su progreso.

Vienen a la mente tres predicciones revolucionarias, hechas en el primer tercio del siglo XX: las de la teoría general de la relatividad de Einstein, las antipartículas de Dirac y el neutrino de Pauli. Las dos primeras recibieron pronta comprobación: entre 1916, cuando Einstein predijo que la luz debería desviarse al pasar cerca de un objeto muy masivo, y 1919, cuando Eddington observó tal desviación durante un eclipse de Sol, mediaron tan sólo tres años; y el positrón, antipartícula del electrón predicha por Dirac en 1930, fue descubierto por Anderson en 1932, solamente dos años después. Sin embargo el neutrino, partícula neutra casi sin masa, que según Pauli debería acompañar a la desintegración beta para salvar así un postulado tan fundamental como el de la conservación de la energía, resultó más elusivo; entre 1931, cuando Pauli lo propuso, y su descubrimiento por Reines, hubieron de pasar cerca de 25 años. No obstante, la gran ilusión se convirtió en realidad en estas tres historias.

Esa gran ilusión no se ha tornado realidad en otros casos, predicciones igualmente bien arraigadas en sus respectivas teorías físicas. Así, las ondas gravitacionales predichas por Einstein no han sido encontradas; los cuarks, que Gell-Mann imaginó en 1963 como los constituyentes del protón, han también rehuido a sus descubridores; los núcleos superpesados, mucho más que el uranio, tampoco se han dejado ver, y el monopolio magnético, imaginado por primera vez en 1932 por Dirac, se nos ha escondido. Empero, en ciertos momentos del desarrollo histórico de las teorías físicas de este siglo se creyó (o aún se cree) firmemente en la existencia de estos objetos elusivos. Descubrirlos, por tanto, resultaría de gran mérito para el experimentador que lo lograra.

No ha de extrañarnos, pues, que en diversas ocasiones grupos experimentales muy serios y en general de buena reputación hayan echado las campanas a vuelo al anunciar que, por fin, la gran ilusión se confirmaba. Se han "descubierto" las ondas gravitacionales, el cuark, la fusión fría y al menos dos veces, el monopolio magnético. En todas las situaciones ocurrió lo mismo: un gran revuelo inicial al darse a conocer el descubrimiento sensacional; una rápida respuesta por parte de otros grupos experimentales, colegas y antagonistas del supuesto descubridor; que como jaurías se lanzaron a demostrar la falsedad del hallazgo; y el epílogo: todo se debía a una falla experimental. (Que si a una mala calibración del aparato, que si a una confusión en los materiales observados.)

Hemos ya relatado en tres trabajos anteriores (*El monopolio magnético*, *Los cuarks* y *Las ondas gravitacionales*, colección La Ciencia desde México, números 11, 22 y 41, Fondo de Cultura Económica, México, 1986, 1987 y 1988, respectivamente) la historia, plena de ideas brillantes y de experimentos precisos, del elusivo monopolio magnético, de los cuarks siempre ocultos en su escondrijo y de las misteriosas ondas gravitatorias. En lo que sigue narraremos la historia de otra gran ilusión de la física actual, la fusión nuclear fría, proceso que podría resolver los problemas energéticos de la humanidad. Lo anterior nos da ocasión de contar la fantástica historia de la física moderna, con sus avatares, sus logros y algunas de sus grandes ilusiones.



NOTA INTRODUCTORIA

En el mundo creado por el gran dibujante holandés M. C. Escher caben la ciencia y la ficción. Sus esquemas de animales entrelazados que llenan el plano del dibujo son dignos del más ducho de los cristalógrafos, pero su manejo de la perspectiva con frecuencia nos engaña. En la *Caída de agua*, que aquí reproducimos, el flujo de la cascada es continuo, sin que nada lo detenga. El agua cae y vuelve a subir, moviendo la turbina sin cesar. La maestría gráfica de Escher ha creado ¡una máquina de movimiento perpetuo!

Mucho esfuerzo humano se ha gastado en la búsqueda de estas máquinas que producen trabajo sin requerir combustible. Desde hace más de un siglo sabemos que estos fantásticos ingenios son pura ficción. La primera ley de la termodinámica, en efecto, los prohíbe porque la energía se conserva. Más aun, las leyes implacables de esta rama de la ciencia son más crueles todavía: la segunda ley de la termodinámica establece que no puede existir una máquina cien por ciento eficiente.

La inteligencia humana ha debido poner, entonces, sus miras en otros objetivos. Si el trabajo no ha de ser gratuito, que por lo menos sea barato. Ello requiere aumentar la eficiencia de nuestras máquinas o disminuir el costo de los combustibles. Así, se ha buscado perfeccionar el motor de combustión interna, las calderas y tantos otros ingenios que producen trabajo. También se ha luchado por hallar nuevos combustibles, más baratos que el carbón o el petróleo. En este camino hemos tropezado con los reactores nucleares de fisión y en el mundo funcionan hoy cerca de 400 de estos reactores aunque su uso sea tan cuestionado. También se han creado las celdas solares, que nos permiten convertir la energía del Sol en electricidad. Hasta ahora el triunfo no es completo y el problema energético del mundo sigue siendo un fantasma cuya sombra no deja de nublar el futuro de la civilización.

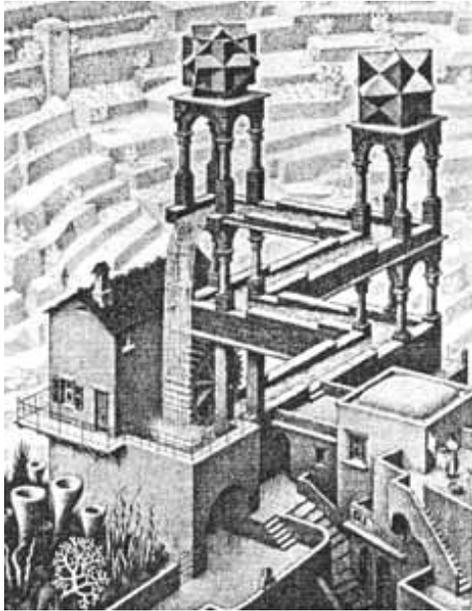
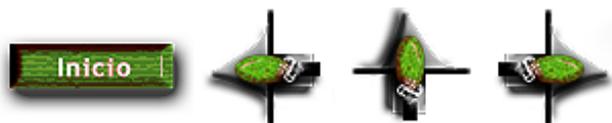


Figura 1. La *Caída de agua*, del pintor holandés M. C. Escher, es un ejemplo de una máquina imaginaria de movimiento perpetuo.

Una alternativa para resolver los problemas energéticos es la fusión de dos núcleos de deuterio, que al fundirse generan energía en cantidades apreciables. Para que los núcleos se unan, es necesario vencer la repulsión de sus cargas eléctricas. Por eso, es preciso inyectarles energía en alguna forma, es decir; gastar combustible. Esto se hace hoy en los reactores de fusión que trabajan a muy altas temperaturas y que requieren de grandes inversiones de dinero. Este tipo de fusión nuclear, la fusión caliente, no ha podido dominarse todavía y queda como un camino abierto.

Si pudiésemos eliminar el uso de esas altísimas temperaturas, todo el proceso sería mucho más sencillo. La *fusión fría*, en efecto, nos daría un método más simple para cubrir todas nuestras necesidades energéticas, mediante reactores pequeños y combustible abundante, pues se encuentra en el agua misma y la de mar es abundante en deuterio. A manera de ejemplo: con la fusión fría entre núcleos de deuterio se obtendría, de un tanque de 2 000 metros cúbicos lleno de agua de mar, energía suficiente para alimentar de electricidad una ciudad como Morelia.

En lo que sigue, relataremos los esfuerzos recientes por alcanzar la fusión fría. Para entender esta historia tendremos que aprender cómo está formado el núcleo del átomo, cuáles son las leyes que lo rigen y cómo reaccionan dos núcleos cuando chocan. Así nos asomaremos a uno de los rincones de la física moderna.



I. UN EXPERIMENTO FRUSTRADO

UN JUEVES SANTO, el 23 de marzo de 1989, los titulares de muchos periódicos anunciaban un descubrimiento científico casi increíble: se había encontrado un método para producir la fusión nuclear a la temperatura ambiente. En contra de la costumbre, este fantástico resultado no había sido dado a conocer primero a la comunidad científica especializada. En vez de emplear los canales habituales —una revista de reconocido prestigio, con árbitros que sujetan todo artículo a censura previa—, los químicos Martin Fleischmann, de la Universidad de Southampton, y Stanley Pons, de la Universidad de Utah, citaron en Salt Lake City a una conferencia de prensa. Ahí dieron a conocer a los periodistas cómo lograban, en un simple frasco de vidrio, la fusión fría.

Controlar la fusión nuclear, y convertirla en un proceso útil para generar energía, ha sido una gran ilusión para muchos científicos e ingenieros de todo el mundo. Con este fin, en los países más desarrollados se han construido gigantescos reactores, que ocupan laboratorios enormes con los aparatos más complejos. El esfuerzo y costo requeridos son tan grandes que ningún país de Europa Occidental pudo, aislado, llevar a cabo un proyecto tal. Para echarlo a andar todos los países europeos tuvieron que unirse en un proyecto conjunto ubicado en Oxford, Inglaterra. Con todo, los resultados no son aún satisfactorios y la fusión nuclear controlada sigue eludiendo a los científicos.

No ha de extrañarnos, entonces, que el anuncio de Fleischmann y Pons, por poco ortodoxo que hubiera sido, generara de inmediato un interés inusitado. Ambos investigadores fueron requeridos al instante por la televisión. En sus primeras entrevistas describían cómo hacían su experimento y, un tanto nerviosos, mostraban con orgullo ante las cámaras un frasco de vidrio que pronto se volvió famoso. En este frasco, decían, sometemos una solución salina de agua pesada —agua que en lugar del hidrógeno común contiene uno de sus isótopos pesados, el deuterio— a un proceso de electrólisis, en el que empleamos un cierto metal, el paladio, capaz de absorber gran cantidad de hidrógeno. Por ello, continuaban, la densidad local del deuterio aumenta considerablemente, lo que propicia que los núcleos se acerquen y se fusionen, con la ganancia correspondiente de energía. Así se podría entender la enorme cantidad de calor observada y la presencia de radiaciones nucleares que, según ellos, habían encontrado de manera sistemática en sus experimentos. Al final de la entrevista, los investigadores siempre explicaban que los detalles técnicos habían sido enviados para su publicación a una revista científica y sugerían al público que no intentara repetir su experimento, porque a pesar de su simpleza, los riesgos inherentes a las reacciones nucleares no dejaban de estar presentes.

El mismo fenómeno que es responsable de la producción de energía en nuestro Sol, ¿se reproducía en la Tierra sin que fueran necesarias la gran densidad y las altísimas temperaturas de las estrellas! No se requerían los aparatos complicados ni las inversiones millonarias que habían mantenido ocupados a miles de científicos durante 30 años para producir la fusión caliente. De inmediato muchas personas, dentro y fuera del campo científico, fueron presa de admiración y los dos químicos se convirtieron en celebridades. Se inició una actividad científica sin precedentes que ocupó de lleno tanto a escépticos como a convencidos de todo el mundo. En los meses de investigación más importantes alteraron su rumbo normal e intentaron verificar, e incluso mejorar; el método de Fleischmann y Pons para producir la fusión fría.

Es factible que ningún otro descubrimiento científico reciente, ni siquiera el de los superconductores calientes, haya generado tantas expectativas ni un revuelo tal. Grupos enteros, incluidos físicos y químicos mexicanos, se lanzaron al análisis de la fusión fría. Los físicos aprendían la electrólisis, y los químicos se enteraban de las técnicas más refinadas para detectar neutrones. El Congreso de Estados Unidos llegó también a intervenir y pronto no sólo las universidades, sino muchos laboratorios industriales, se dedicaban a la búsqueda de la fusión en frío. El Secretario de Energía de EUA formó el 24 de abril de 1989 un Grupo de Estudio destinado a revisar experimentos y teorías en este campo, e identificar posibles líneas de acción, incluidas aquellas que pudieran conducir a las aplicaciones prácticas. Después de organizar reuniones y visitas a muchos laboratorios y revisar con cuidado todas las evidencias en pro y en contra, el Grupo de Estudio concluyó, en su informe del 26 de noviembre del mismo año, que "los resultados experimentales sobre el exceso de calor en las celdas calorimétricas no presentan evidencia convincente alguna de que los fenómenos atribuidos a la fusión fría puedan resultar en una fuente útil de energía". Además, el Grupo decidió que los resultados experimentales presentados hasta la fecha tampoco aportaban pruebas concluyentes que asociaran el calor anómalo, que se dice haber observado, con un proceso nuclear... "Por tanto; el Grupo de Estudio declara que la evidencia actual sobre el descubrimiento de un nuevo proceso nuclear, llamado fusión fría, no es concluyente."

No sólo en Estados Unidos se habían formado grupos semejantes. En México, varios miembros de las Sociedades Mexicanas de Física, de Ciencia de Superficies y Vacío, de Electroquímica y de la Sociedad Química de México, se reunieron entre el 24 de mayo y el 14 de Julio de 1989 en cuatro ocasiones y concluyeron: "Aún no se ha podido establecer o negar en forma confiable y reproducible la existencia de una actividad nuclear asociada a esta fenomenología; en todo caso, aun los niveles de radiación más altos registrados hasta ahora por algunos grupos no permiten contemplar su uso como fuente de energía en el corto o mediano plazos."

Todo ello echó por tierra la fusión fría y otra gran ilusión quedó en pie, aunque algunos meses después la polémica aparentaba estar viva todavía.



II. LA FÍSICA Y LA QUÍMICA DEL SIGLO XIX

SI DESEAMOS entender el experimento de Fleischmann y Pons, y determinar el lugar que ocupa en la ciencia actual, hemos de asomarnos a la historia del núcleo atómico y de los esfuerzos realizados para obtener su fusión. Así averiguaremos por qué se obtiene energía con la fusión, y cuáles son las posibles radiaciones que emanan del núcleo en este proceso. También deberemos ocuparnos de la electrólisis. Para situar estas historias en perspectiva, lo mejor es remontarnos al pasado y hacer un breve relato de la evolución de nuestras ideas sobre la estructura de la materia. Habremos, pues, de echar una ligera ojeada a la materia, resumiendo parte de lo que ya dijimos en los números 3 y 68 de esta colección.

Pondremos primero atención en ciertos aspectos de la física y la química del siglo pasado, para luego relatar la historia de algunos descubrimientos importantes: el electrón, la radiactividad y el núcleo. El modelo planetario clásico del átomo, insostenible, nos lleva entonces de la mano a la nueva mecánica, la cuántica. Con su ayuda, y con el encuentro del neutrón, podemos ya entender los principios básicos para aclarar la estructura del núcleo atómico, y con ellos la importancia de la fusión nuclear. Finalmente, si describimos algo de lo que es la electroquímica, nos será posible situar el experimento de Fleischmann y Pons en su justa dimensión.

Empecemos este rápido vistazo a la materia por el principio, esto es, los albores de la cultura occidental: la concepción griega del átomo. Las ideas atómicas del precursor Demócrito durmieron plácidamente durante muchos siglos, hasta que el químico inglés John Dalton las despertó, cuando ya comenzaba el siglo XIX. Con los átomos de Dalton se explicaba la ley de las proporciones múltiples, que había expuesto claramente en 1803. A diferencia de los de Demócrito, los átomos de Dalton resultaban del carácter experimental de la ciencia y sin duda lo reflejaban. Con ellos se lograba, por decirlo así, unir las ideas del padre de la química, Antoine de Lavoisier, con las del sabio griego.

Los químicos del siglo pasado confundían el concepto de molécula —que, hoy lo sabemos, es un conjunto de átomos— con el de átomo. La diferencia entre ambos conceptos finalmente se aclaró, y el químico ruso Dimitri Mendeleev logró acomodar a los átomos en su bien conocida tabla periódica. Cuando descubrió huecos en su tabla, debidos a la ausencia de algunos átomos cuyas propiedades químicas podía predecir, Mendeleev sugirió la existencia de seis elementos químicos desconocidos hasta entonces. Al encontrarse el galio, el escandio y el germanio, se empezó a completar la tabla de Mendeleev con lo cual adquirió plena ciudadanía científica y el ruso se convirtió en el químico más famoso del mundo en esa época. Los otros tres elementos tardaron más tiempo en ser descubiertos; el renio y el polonio se encontraron a finales del siglo XIX y el tecnecio a mediados de nuestro siglo.

Mientras tanto, otros hombres de ciencia tampoco se dormían en sus laureles. El escocés James Clerk Maxwell sintetizó todo lo que se sabía por aquellos días sobre los fenómenos eléctricos y magnéticos. Este conocimiento se hallaba hasta entonces disperso en varias leyes experimentales, debidas a Coulomb, Ampère y Faraday. Maxwell las unió al postular sus ecuaciones, que constituyen la base de la teoría electromagnética. Llegamos así a la segunda gran síntesis de la historia de la física. La primera fue la lograda por otro ciudadano británico, el gran Isaac Newton, quien unió la mecánica de los cuerpos celestes con aquella que rige el movimiento de los cuerpos en la Tierra. En la segunda síntesis, Maxwell unificó la electricidad y el magnetismo.

En Alemania, entre tanto, se desarrollaba el estudio de la óptica y de la luz que emiten los elementos químicos. Usando un simple aparato, Kirchhoff y Bunsen descubrieron que cada elemento químico produce luz con un conjunto característico de frecuencias, que es como la huella digital de cada átomo. Lo misterioso del fenómeno llevó a los científicos a llamar al conjunto de frecuencias luminosas el *spectro* del átomo y, en consecuencia, al simple aparato se le dio el nombre de espectroscopio. Aun sin entender su origen, los químicos del XIX usaban los espectros como base del análisis químico cualitativo, pues la luz emitida por un compuesto cualquiera les permitía distinguir los elementos que lo forman. Fue así como la química pudo desarrollarse y avanzar en forma acelerada. Lo anterior es de hacerse notar, pues es un ejemplo más de algo nunca comprendido por los organismos que supuestamente apoyan hoy en día a la ciencia en los países del llamado Tercer Mundo: un conocimiento científico, por embrionario que sea, puede usarse en el avance tecnológico.

Además de la mecánica newtoniana, del electromagnetismo de Maxwell y de los átomos de los químicos, con todo y sus espectros y moléculas, la ciencia del siglo XIX desarrolló otra arma poderosa para el estudio de la materia y

su estructura: la termodinámica. En ella desempeñan un papel fundamental conceptos como el de temperatura, el de energía interna de un cuerpo macroscópico y el de entropía, variable que en alguna forma mide el desorden que tienen estos cuerpos en sus diversos estados. Los sistemas macroscópicos pueden sufrir transformaciones, siempre sujetas a la primera ley de la termodinámica que nos dice que la energía ni se crea ni se destruye, y a la segunda ley de esta ciencia que indica que la entropía siempre aumenta cuando un sistema aislado experimenta algún cambio.

Un elemento más de la ciencia decimonónica es interesante para nuestra historia de la fusión fría: el que estudia las relaciones entre electricidad y química. Las primeras observaciones datan de 1711, cuando el profesor de la Universidad de Bolonia, Luigi Galvani, descubrió que al tocar con el extremo de su bisturí una terminación nerviosa de la pata de una rana, ésta se contraía, siempre y cuando mantuviera el otro extremo del bisturí en contacto con un músculo. Pronto se percató Galvani de que este efecto era más notable y prolongado si en vez del bisturí usaba un alambre hecho de cobre y hierro, y tocaba con un metal al nervio y con el otro al músculo. Poco después, otro científico italiano continuó el experimento y descubrió que el hallazgo de Galvani se debía a que la unión de algunos metales produce electricidad. Intrigado, Alessandro Volta sustituyó las ancas de rana por otros materiales. Apiló, por ejemplo, pequeños discos de piel sobre otros de cartón empapados en agua salada y los intercaló con pares de monedas de plata y de zinc. Creó así lo que ahora denominamos pila voltaica. Con ella logró poner al rojo vivo un alambre delgado que unía los dos extremos de la pila. Galvani y Volta pusieron de manifiesto las estrechas relaciones entre la física, la química y la biología. Así se fundan los principios de investigación de una interdisciplina, la electroquímica, especialidad profesional de Fleischmann y Pons.

El mismo año en que Volta inventó la batería, los científicos ingleses William Nicholson y Anthony Carlisle encontraron por accidente que con la electricidad se puede disociar compuestos químicos. En otros términos, se descubre por azar la electrólisis, técnica que luego fue analizada más a fondo, también en Inglaterra, por Humphry Davy y su ayudante Michael Faraday, el mismo que descubriera la inducción electromagnética y quien tal vez haya sido el más grande experimentador científico hasta la fecha. Faraday descubrió las leyes de la electrólisis, que establecen la cantidad de electricidad necesaria para producir tal o cual elemento químico por este medio. Ya entonces se utilizaba como instrumento básico la celda galvánica o celda electroquímica, actor importante en nuestra historia, y que, según se ve en la figura 2, consiste de un recipiente, en general de vidrio, lleno de alguna solución líquida, el electrolito, dentro del cual se introducen dos electrodos metálicos conectados externamente a una batería. Al electrodo positivo: Faraday le denominó ánodo, y al negativo cátodo; por ello, el mismo Faraday nombró aniones y cationes, o más simplemente iones, a los productos de la disociación del electrolito en cada uno de los electrodos.

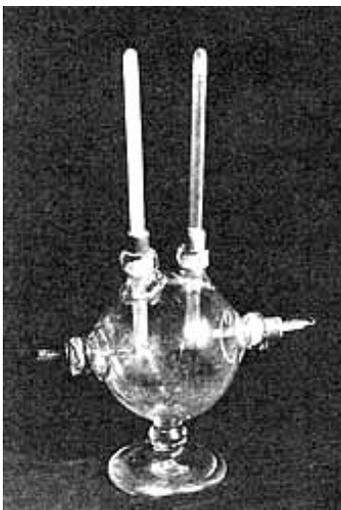
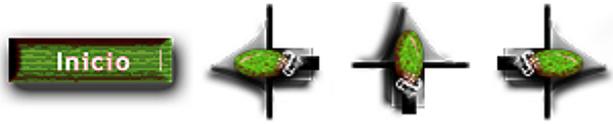


Figura 2. La celda electrolítica usada por Faraday.

Así las cosas, llegamos al nuevo siglo, al nuestro. En sus albores habrían de sucederse una a otra grandes revoluciones en los conceptos de la ciencia, hasta culminar con la más grande de ellas: la revolución cuántica. Relataremos ahora, a grandes pincelazos, esa historia en la que aparece por primera vez nuestro actor principal, el

núcleo atómico.



Inicio

III. EL ELECTRÓN, LA RADIATIVIDAD Y EL NÚCLEO

COMPRENDER las ideas básicas que hay detrás de la fusión nuclear implica entender un poco la estructura de la materia. Como hemos visto, hacia fines del siglo pasado los científicos habían establecido por fin la existencia de los átomos, sugeridos por los griegos más de dos mil años antes. Sin embargo, los átomos seguían siendo concebidos como los constituyentes más elementales, y por lo tanto indivisibles, de la materia. Después, en una secuencia de descubrimientos impresionantes realizados en apenas tres lustros, se hizo evidente que los átomos poseen una estructura interna y no son, por tanto, elementales.

La cascada de importantes hallazgos científicos comienza el 5 de noviembre de 1895, cuando Röntgen descubre los rayos **X**, y termina en 1911 al anunciar Rutherford la existencia del núcleo atómico. En varios de estos descubrimientos, el tubo de rayos catódicos —corazón del cinescopio de nuestros televisores actuales y conocido entonces como tubo de Crookes, en honor a su inventor— desempeñó el papel central. En forma análoga, la balanza de torsión había servido mucho a la ciencia desde 1777, año en que Coulomb inventó ese aparato tan útil y tan simple. Y ya relatamos en el capítulo anterior cómo otro simple instrumento, el espectroscopio de Kirchhoff y Bunsen, resultó crucial para el desarrollo de la química y de la física del átomo en los finales del siglo XIX. La balanza de torsión, el espectroscopio y el tubo de Crookes, con su gran influencia en el desarrollo de la física, nos ilustran al menos dos hechos importantes: la unidad de esta ciencia, por un lado, y la posibilidad de hallar nuevos fenómenos cuando se emplean aparatos simples de manera ingeniosa y perspicaz, por el otro.

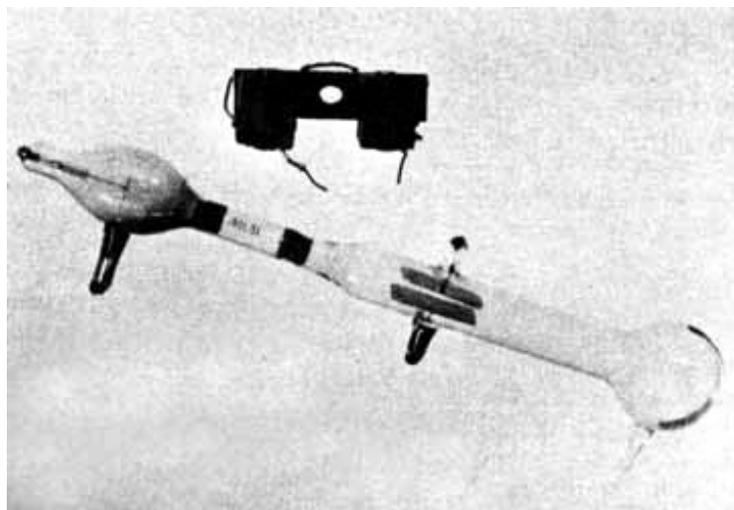


Figura 3. El tubo de Crookes que se utilizaba en el laboratorio de Thomson.

En 1897, J.J. Thomson descubrió la naturaleza de los rayos catódicos y con ella la primera partícula en verdad elemental: el electrón. Cuentan que Thomson era un físico experimental muy torpe con las manos y que no sabía manipular los aparatos del laboratorio. Sus alumnos preferían que sólo les diera indicaciones, para que luego ellos realizaran las mediciones experimentales. No obstante, Thomson demostró que los rayos del tubo de Crookes están constituidos en realidad por minúsculas partículas, los electrones. Por este trabajo, en 1906 se otorgó a Joseph John Thomson el premio Nobel de Física. En años posteriores, al menos siete de aquellos alumnos que le habían impedido destruir aparatos y que alguna vez siguieron fielmente sus consejos obtuvieron sendos premios Nobel. Qué duda cabe, ¡J. J. Thomson fue un gran maestro!

En Baviera, por la misma época, otro curioso jugaba también con su tubo de Crookes. El ingeniero mecánico alemán Wilhelm Röntgen se dio cuenta, en 1895, que los rayos catódicos podían inducir luminiscencia a distancia. Había hallado una radiación muy penetrante y misteriosa, tan misteriosa que la llamó **X**. Durante siete semanas

experimentó sin descanso con los rayos X; mostró que eran altamente ionizantes y que no podían desviar los campos eléctricos o magnéticos. Un mes después, en enero de 1896, habló por primera vez en público de su descubrimiento; al acabar la charla, tomó la radiografía de la mano de uno de los asistentes, un médico suizo. De inmediato Röntgen se volvió famoso y sus rayos X más todavía. Al instaurarse en 1901 el premio Nobel, Röntgen recibió el primero en el campo de la física.

Una curiosa similitud existe entre la historia de la fusión fría y el descubrimiento de los rayos X: en ambos casos la conmoción y la confusión entre el gran público fueron grandes. Con frecuencia se malinterpretó la naturaleza de los rayos X y se les supuso propiedades que no tenían. Los legisladores de Nueva Jersey, en EUA, por ejemplo, intentaron aprobar una ley que prohibiera el uso de binoculares de rayos X en el teatro, para así resguardar el pudor de las damas; y el famoso Superman, héroe *pop* norteamericano nacido en 1938, fue dotado, entre sus facultades superiores, con una potente vista de rayos X. Desgraciadamente, como veremos después, las similitudes entre los descubrimientos de los rayos X y de la fusión fría ahí terminan.

Volviendo al tema de la estructura de la materia, el siguiente descubrimiento importante para nuestra historia fue aquel del físico francés Henri Becquerel. Intrigado con los resultados de Röntgen se preguntó si acaso los materiales fluorescentes podrían emitir rayos X. En 1896, luego de una fascinante serie de acciones fortuitas, Becquerel descubrió un nuevo tipo de radiación producida por el uranio. Posteriormente, la célebre polaca Marie Sklodowska y su marido Pierre Curie convirtieron en cuantitativos los estudios cualitativos de Becquerel. Fue madame Curie quien denominó radiactividad al nuevo fenómeno. Ella es la única mujer que ha recibido dos veces el premio Nobel, el primero compartido con su esposo y con Henri Becquerel en 1903. Los descubrimientos de Thomson, Becquerel y el matrimonio Curie nos hicieron ver claramente que el átomo, contra lo que su nombre indica, es un sistema divisible.

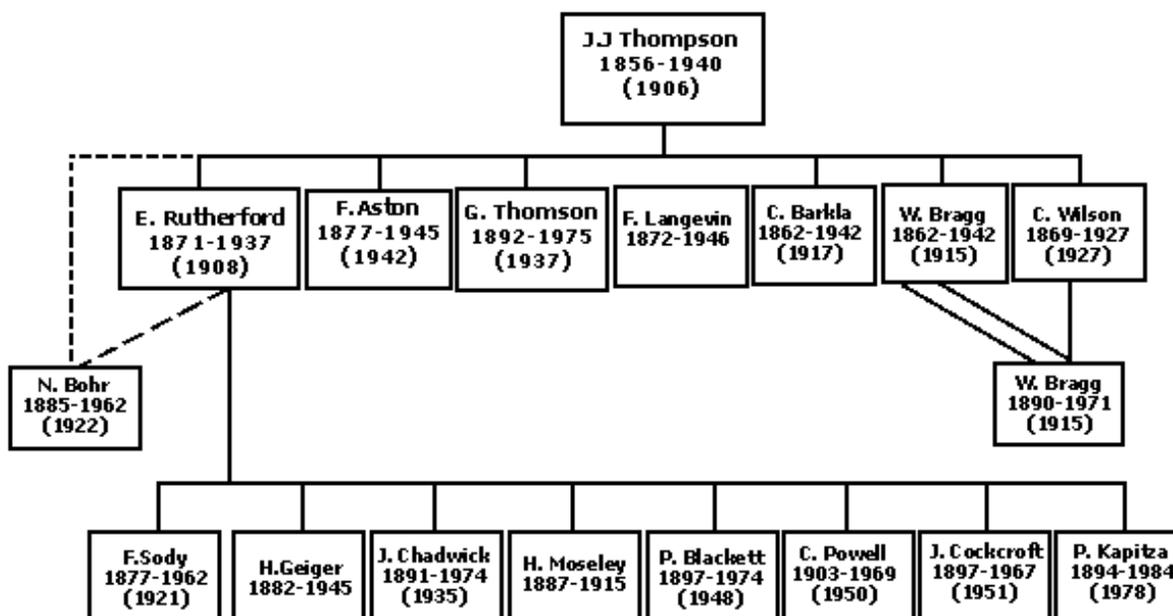


Figura 4. Árbol genealógico-científico de J.J. Thomson y de E. Rutherford. La raya simple indica que el maestro dirigió la tesis doctoral del alumno, la línea punteada que dirigió su estancia posdoctoral y la doble raya que, de hecho, ¡es su progenitor! Entre paréntesis aparece el año en el que el científico obtuvo el premio Nobel.

Otro paso importante en esta historia lo dio un alumno de Thomson, el neozelandés Ernest Rutherford, quien habría de ser conocido como el padre de la física nuclear. Rutherford es una de las personalidades más avasalladoras de la

física, y por tanto de la cultura de este siglo. Nacido en Nueva Zelanda, en los linderos del Imperio británico, por sus brillantes estudios obtuvo una beca para estudiar en Cambridge, a donde llegó en 1895 para trabajar bajo la mirada vigilante de J.J. Thomson, el descubridor del electrón.

Ya formado como investigador en los famosos laboratorios Cavendish, en la misma universidad donde antes habían trabajado Newton y Maxwell, le ofrecieron regresar a la periferia del Imperio, ahora como profesor de la Universidad McGill de Montreal. Ahí investiga sobre la radiactividad y sus descubrimientos lo llevan de regreso a la metrópoli; en 1906 va a trabajar a Manchester, otra cantera prestigiosa de la ciencia inglesa, donde habría de generar toda una nueva forma de hacer física, amén de descubrir el núcleo atómico y ganar el premio Nobel ¡de química! —gran paradoja, para uno de los más grandes físicos—. Regresa a Cambridge en 1919, ahora como director de los Cavendish y ocupa este puesto hasta su muerte en 1937. Tres son pues las etapas bien marcadas de la vida del gran físico: McGill, Manchester y Cambridge; en cada una de ellas obtuvo resultados que harían vanagloriarse a cualquiera.

Rutherford estudió los efectos de la radiactividad y de los rayos **X** sobre la conductividad eléctrica de los gases. En 1898 encontró que había al menos dos tipos de radiactividad, que él llamó rayos alfa (α) y rayos beta (β). Los rayos β son muy penetrantes, a diferencia de la radiación alfa, que puede detenerse con ayuda de muy delgadas laminillas de aluminio. Los rayos beta se desvían al entrar en un campo magnético, en la misma dirección que los electrones que forman los rayos catódicos en el tubo de Crookes y en dirección contraria a la de los rayos α . Con estos y otros datos, Rutherford demostró, primero, que los rayos β son electrones y, posteriormente, que los rayos alfa son iones de helio.

Por aquel entonces, se había ya encontrado un tercer tipo de radiactividad, la gamma (γ), que descubrió en Francia Pierre Villard en 1900. Esta radiación es muy penetrante y un campo magnético no puede desviarla. El mismo Rutherford y su estudiante portugués Da Costa Andrade demostraron que los rayos gamma son de naturaleza idéntica que los rayos **X**, es decir, los forman ondas electromagnéticas como la luz, aunque de mucho mayor frecuencia; de ahí su gran penetración.

Otro descubrimiento temprano y trascendente de Soddy y Rutherford, publicado en 1903, llega muy hondo al corazón de la química. Afirman que un elemento radiactivo, al emitir rayos beta o alfa, se convierte en un elemento químico distinto. Los elementos de la tabla periódica de Mendeleev no eran, en consecuencia, inmutables. Esta afirmación, sencilla pero difícil de aceptar, contradecía uno de los axiomas básicos de la ciencia de aquella época. Parecía que la vieja alquimia renacía...

En efecto, la alquimia primitiva surge en Egipto al principio de la era cristiana y su origen se debe, qué duda cabe, al esfuerzo de los primeros metalurgistas por convertir en el laboratorio a los metales menos nobles en oro. Alejandría era entonces el cruce de todos los caminos intelectuales de la época: la filosofía helenística, el misticismo de Oriente y la tecnología egipcia —no por casualidad *khemia*, posible origen de la palabra química, significa Egipto—. En su afán por conservar sus secretos tecnológicos, los viejos alquimistas árabes comenzaron a emplear un lenguaje cifrado, cada vez más críptico y apto sólo para iniciados. El camino al misticismo estaba así abierto y la alquimia se alejó del laboratorio y por ende de la ciencia. Rutherford, sin embargo, vuelve la transmutación de los elementos al cauce científico, contradice uno de los postulados básicos de la química de su tiempo, y por ello recibe el premio Nobel de Química en 1908. Al recibirlo dice: "He visto muchas transformaciones en mi vida, pero ninguna tan rápida como la que acabo de experimentar, de físico a químico en un instante."

Pero el más grande logro de Rutherford fue probar la existencia del núcleo atómico. Este hallazgo lo realizó con la ayuda de sus discípulos, el alemán Hans Geiger y el neozelandés Ernest Marsden, entonces de sólo 25 y 18 años de edad, respectivamente. A sugerencia de Rutherford, Geiger y Marsden midieron la dispersión de rayos alfa por hojas delgadas de oro, encontrando un resultado sorprendente: ¡había alfas dispersadas hacia atrás! Según Rutherford, dada la enorme velocidad de esas partículas, era como si las balas de una pistola rebotaran en hojas delgadas de papel. Geiger y Marsden publicaron sus resultados en 1909. Dos años después, y luego de muchos cálculos, para los cuales empleó la mecánica de Newton, Rutherford llegó a la conclusión siguiente: el campo eléctrico tan intenso que se requiere para desviar las veloces partículas alfa sólo puede producirlo una carga positiva muy concentrada en el corazón del átomo, un núcleo que es 10 000 veces más pequeño que el átomo, es

decir que ocupa una región cuyo radio es cercano a 10^{-13} cm.*  Tal carga positiva está equilibrada por los electrones negativos que en alguna forma circundan a este núcleo atómico.

Los grandes cambios de la cultura del hombre, y en particular de su ciencia, han surgido siempre cuando con argumentos sencillos pero contundentes se muestra que algo importante anda, en esencia, mal. Eso ocurrió con el modelo atómico basado en la física clásica que Rutherford imaginó: el átomo como un sistema planetario en miniatura: unos electrones con carga negativa orbitan alrededor de un núcleo, cuya carga es positiva y cuya masa es miles de veces mayor que la electrónica. Intuía, pues, que en lugar del Sol, estaba el núcleo atómico; que en vez de los planetas, se encontraban los electrones negativos, y que la fuerza de unión entre unos y otros, electrones y núcleo, ya no era la atracción gravitatoria como entre planetas y astro, sino la fuerza eléctrica de Coulomb, que entre cargas de signo opuesto es atractiva.

Si bien los experimentos en que Rutherford hacía chocar violentamente partículas alfa contra laminillas de oro y la existencia ya entonces bien conocida de los electrones sugerían de manera natural al gran físico neozelandés un modelo atómico como el antes descrito, concebir el átomo como un sistema planetario microscópico es incorrecto e insostenible si se cree al mismo tiempo en la estabilidad de la materia y en la física clásica —cuyos pilares son la mecánica de Newton y el electromagnetismo de Maxwell.—

El argumento que liquida el modelo planetario del átomo o que entierra a la física clásica es simple. La teoría electromagnética clásica nos dice que una carga acelerada como el electrón que da vueltas alrededor del núcleo debe radiar energía en forma de ondas electromagnéticas. La energía que estas ondas acarrean surge de la del propio electrón, por lo que éste pierde velocidad y se acerca al núcleo. Las órbitas electrónicas se acortan entonces más y más, y el electrón no recorre ya una elipse como si fuera un planeta sino una espiral que se encoge a cada instante. El destino final e irremisible de los electrones es el núcleo positivo que les atrae, y el átomo cesa de existir en un tiempo mil veces menor que el que tarda en llegar a nuestros ojos la luz de un foco que se enciende a un metro de distancia de nosotros. Los átomos clásicos a la Rutherford no son, pues, estables.

Para remediar tan incómoda situación, el gran físico danés Niels Bohr propuso en 1913 algunos postulados no ortodoxos y un tanto *ad-hoc*. Bohr suponía la existencia de unas cuantas órbitas electrónicas especiales: mientras el electrón se halla en ellas no radia, y sólo puede hacerlo al brincar de una a otra. Es decir; bajo ciertas condiciones dinámicas, aunque el electrón dé vueltas alrededor del núcleo y sufra la aceleración centrípeta, su energía se mantiene constante y no cae hacia el núcleo. El átomo de Bohr; por lo tanto, es estable. A pesar de lo poco intuitivo de estos postulados, el modelo de Bohr pudo explicar el espectro del átomo de hidrógeno, analizado experimentalmente por Balmer a finales del XIX.

Los postulados de Bohr y la física clásica son incompatibles. Todo parecería indicar; dados los logros del nuevo modelo y sus postulados no ortodoxos, que una nueva forma de pensar se hacía necesaria cuando se trataba de entender sistemas físicos microscópicos, como el átomo. Esos nuevos conceptos se fueron delineando de manera paulatina hasta quedar firmemente establecidos a finales de los años veinte con la mecánica ondulatoria de Schrödinger, la mecánica de matrices de Heisenberg y la simbiosis de ambas lograda por Dirac. Entonces surge la nueva física, la física cuántica.



[Nota *] 

* En la notación de potencias de 10 que utilizamos en este libro, el número 10^{-13} es igual a $1/10^{13}$ y 10^{13} es igual a $10 \times 10 \times 10 \dots$ trece veces. Es decir, 10^{-13} vale $1/10\,000\,000\,000\,000$. Éste es un número muy pequeño.



IV. LA MECÁNICA CUÁNTICA

EN EL primer cuarto de nuestro siglo, las ideas cuánticas van surgiendo poco a poco en forma un tanto deshilvanada. El primero en introducir el *cuanto de acción* es Planck, físico alemán que anunció su teoría de la radiación del cuerpo negro en la Navidad de 1900. Planck se vio forzado a suponer una hipótesis no ortodoxa y también *ad-hoc*: la energía luminosa de frecuencia ν no es continua, viene en paquetes, en *cuantos* cuya energía E es igual a $h\nu$. Para explicar los datos experimentales, ajustó esa constante h , hoy llamada de Planck, y encontró el pequeñísimo valor $h = 6.626 \times 10^{-27}$ erg.s.

Quien resolvió otro rompecabezas —el propuesto por el efecto fotoeléctrico— también usando el postulado de cuantización de la luz, fue Albert Einstein. Para explicar por qué la luz de baja frecuencia era incapaz de arrancar electrones de ciertos materiales, mientras que la radiación de alta frecuencia sí desprendía los electrones del sólido, Einstein en 1905 volvió a suponer que la energía de un cuanto de luz de frecuencia ν estaba dado por $h\nu$. Fue por ese trabajo que recibió el premio Nobel en 1921.

El tercer gran paso en la evolución de las ideas cuánticas ya lo hemos relatado: Bohr calculó el espectro del hidrógeno, y lo explicó bien, suponiendo la existencia de sus órbitas especiales y la fórmula de Planck para obtener la frecuencia radiada por el electrón al pasar de una órbita estable a otra. Una vez más, hace su aparición la constante h de Planck.

Un golpe más a la teoría clásica provino en 1922 al observarse el efecto Compton: al dispersar rayos X con un bloque de parafina emergía una radiación de frecuencia menor que la incidente. Suponiendo los cuantos de luz con energía $h\nu$, la conservación de la energía y el ímpetu de acuerdo a las leyes de la relatividad, es fácil explicar este efecto. Como veremos después, tanto el efecto fotoeléctrico como el Compton forman parte esencial de las técnicas de detección de la radiación gamma. Gracias a estos dos efectos, el concepto de cuanto de luz se había vuelto, a mediados de los años veinte, parte de la física y hubo que bautizarlo. El químico norteamericano G. N. Lewis acuñó el nombre de *fotón* que usamos desde entonces.

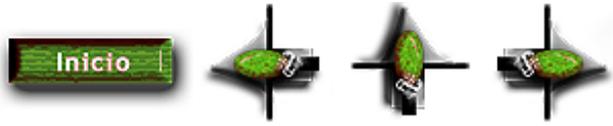
Los tiempos estaban ya maduros para que se formulara una verdadera teoría física aplicable al mundo microscópico. En forma independiente, dos físicos llegaron casi simultáneamente a postular esa nueva física: Werner Heisenberg, alemán, inventó la llamada mecánica de matrices, y Erwin Schrödinger, austriaco, hizo lo propio con la mecánica ondulatoria. Como se demostró poco después, ambas formulaciones son equivalentes.

Esta nueva teoría permitió describir las interacciones que ocurren en el mundo microscópico tanto entre las partículas como entre éstas y los fotones. De la nueva física surge un concepto revolucionario: la incertidumbre asociada a los procesos de medición. Un experimento pensado que imaginó Heisenberg nos servirá para ilustrar esta particularidad del microcosmos, donde las operaciones para medir el ímpetu de una partícula microscópica interfieren con las que se deben realizar para determinar su posición. Su razonamiento es el siguiente: cuando observamos una partícula, debemos verla en alguna forma y para ello se requiere iluminarla con luz de frecuencia apropiada. Mientras más pequeña sea la partícula, necesitamos luz de menor longitud de onda y, por lo tanto, de mayor frecuencia. Como $E = h\nu$, lo anterior implica usar fotones más energéticos, que deben rebotar en la partícula para luego llegar a nuestro ojo, al microscopio o a cualquier otro detector que empleemos. Por tanto, la velocidad de la partícula sufre cambios siempre mayores, pues la colisión con los fotones cada vez más energéticos la altera más. En otros términos, a medida que deseamos fijar con mayor precisión la posición de una partícula, la medición de su velocidad se torna más imprecisa.

Éste es el contenido básico del principio de incertidumbre, que Heisenberg formuló en 1927: el producto de los errores con que podemos medir posición e ímpetu de una partícula tiene un mínimo, que es inherente a la naturaleza y que está dado por la constante h de Planck.

El principio de Heisenberg limita la aplicación de los conceptos clásicos de partícula y de onda. Ondas y partículas son habituales en nuestro mundo cotidiano porque en él vemos cuerpos grandes y lentos. Empero, en el mundo microscópico, ondas y partículas son conceptos que se reducen a una mera forma de hablar y ya no son aplicables a los procesos atómicos o nucleares. Así, en la mecánica cuántica no caben ya las trayectorias que siguen las partículas clásicas. Se les ha canjeado por las soluciones de la ecuación que Schrödinger postuló, soluciones que se continúan llamando ondas.

¿Cómo es que estas ondas de Schrödinger reemplazan al viejo concepto de órbita? La respuesta a esta crucial pregunta la dio Max Born, el maestro de Heisenberg, poco tiempo después de que el físico austriaco publicara la mecánica ondulatoria. Según Born, la solución de la ecuación de Schrödinger da la probabilidad de encontrar la partícula. La mecánica cuántica es una teoría probabilística pues el principio de Heisenberg, incluido en las ecuaciones de la mecánica ondulatoria, altera profundamente el determinismo clásico.



V. EL NÚCLEO Y SUS FUERZAS

LA FÍSICA puede describirse como un continuo vaivén entre teoría y experimento, aunque éste tiene siempre la última palabra. Mientras los grandes teóricos desarrollaban las ideas cuánticas, Rutherford y sus alumnos continuaban ocupados desentrañando los misterios del núcleo. Una vez que se descubrió el núcleo, la pregunta que surgió de inmediato fue, ¿de qué está compuesto? Como se sabía ya desde el siglo pasado que las masas de los elementos químicos se aproximan mucho a múltiplos enteros de la masa del hidrógeno, resultó natural pensar que los distintos núcleos estaban formados por protones, puesto que el del hidrógeno consiste de un solo protón. Sin embargo, ésta no puede ser la historia completa, ya que para entender la neutralidad eléctrica del átomo se requiere postular la existencia de un cierto número de protones en el núcleo, mientras que para explicar la masa es necesario el doble de ellos.

Tomó dos décadas descifrar esta incógnita y muchos físicos siguieron pistas falsas —entre ellas la de suponer la existencia de electrones dentro del núcleo— antes de encontrar al acompañante del protón en el centro de los átomos. En vista de las predicciones de la mecánica cuántica se puede entender fácilmente uno de los argumentos más contundentes para descartar un núcleo compuesto por protones y electrones. Si aplicamos el principio de incertidumbre a los electrones dentro del núcleo, concluimos de inmediato que las energías electrónicas serían muy superiores a las medidas en la desintegración beta y, también, mucho mayores a las producidas por el campo eléctrico de atracción debido a los protones, fuerza que se consideraba como responsable de confinar a protones y electrones dentro del núcleo. El razonamiento teórico es el siguiente: si una partícula de masa m se confina en un local de largo l , su incertidumbre en la correspondiente componente de la velocidad es mayor que h/ml , pues de lo contrario se violaría el principio de Heisenberg. A medida que l se hace menor, crece esta incertidumbre y por ende la energía cinética de m . El efecto es mayor, también, mientras menor sea la masa de la partícula, y afecta, por tanto, más a los electrones que a los protones, pues la masa de éstos es 2 000 veces mayor que la de aquéllos. Si usamos los datos de la Tabla 1, tomando para l el valor de 10^{-13} cm, que es el apropiado al núcleo, las energías resultan enormes.

El 27 de febrero de 1932 James Chadwick, alumno de Rutherford, informó a la comunidad científica que había encontrado pruebas de la existencia de una nueva partícula neutra, a la cual llamó neutrón. Los físicos no tardaron mucho en darse cuenta que éste era el acompañante misterioso del protón en el núcleo atómico. La existencia del neutrón, cuya masa es muy parecida a la del protón, permitió ver viejos conocimientos desde una nueva perspectiva. Primero, fue evidente que la razón de que la masa atómica sea casi un múltiplo entero de la masa del átomo de hidrógeno, hecho ya conocido desde el siglo pasado, es que las masas del neutrón y del protón sean casi iguales. También fue claro que el comportamiento químico, ligado a las capas externas de electrones, depende sólo del número de protones, sin que importe la cantidad de neutrones en el átomo. Por otro lado, es posible que con el mismo número Z de protones —es decir, para igual elemento químico— y un número variable de neutrones N se puedan formar sistemas estables. De ahí el origen de los isótopos de un elemento químico, que ocupan el mismo lugar en la tabla periódica pero que pueden tener diferente masa.

TABLA 1. Datos y unidades atómicos para sistemas atómicos y nucleares.

	MASAS
electrón	$m_e = 9.1091 \times 10^{-28}$ g
	$m_p = 1.6725 \times 10^{-24}$ g = 1836 m_e
	$m_n = 1.6748 \times 10^{-24}$ g = 1839 m_e
	CARGAS
elemental	$e = 1.6021 \times 10^{-19}$ c
electrón	- e

protón $+ e$

RADIOS

atómico $\approx 10^{-8} \text{ cm} = 1 \text{ \AA}$
nuclear $\approx 10^{-13} \text{ cm} = 1 \text{ f}$

ENERGIAS TÍPICAS

atómicas $\approx 1.6 \times 10^{-12} \text{ erg} = 1 \text{ eV}$
nucleares $\approx 1.6 \times 10^{-6} \text{ erg} = 1 \text{ MeV}$

OTRAS CONSTANTES IMPORTANTES

velocidad de la luz $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$
constante de Planck $h = 6.626 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{s}$
número de Avogadro $N_A = 6.023 \times 10^{23} \text{ moléculas/g.mol}$

Los isótopos fueron conocidos veinte años antes que el neutrón. Poco después del descubrimiento de la radiactividad, se encontró que existían ciertos elementos con las mismas propiedades químicas pero con características radiactivas diferentes. Tal es el caso del plomo: el más abundante no es radiactivo, pero si lo es el que se separa de las sales de uranio. En 1910, Soddy dio a esas variedades inestables de un mismo elemento el nombre que todavía hoy usamos: radioisótopos. También los elementos no radiactivos tienen isótopos; esto lo descubrió Thomson en 1913 al observar la deflexión de haces atómicos de neón. Unos átomos tenían una relación de masa a carga igual a 20, y otros igual a 22 veces la del hidrógeno. Aston, otro discípulo de Thomson que también recibió el premio Nobel, descubrió los isótopos estables de muchos elementos y en todos los casos su masa resultó ser casi un múltiplo entero de la del hidrógeno.

Al descubrirse el neutrón, muchos problemas se resolvieron. Sin embargo una nueva dificultad se presentó, pues no resultaba claro qué fuerza mantenía unidos a protones y neutrones dentro del núcleo. Tal fuerza no puede tener carácter eléctrico, no sólo porque no actuaría entre los neutrones sino porque no es lo suficientemente intensa para confinar una masa como la del protón o la del neutrón en una región tan pequeña como la ocupada por el núcleo. Este argumento, que ya dimos antes, está basado en el principio de incertidumbre. Por lo mismo, la fuerza dentro del núcleo no puede ser la gravitacional; a las distancias nucleares, la atracción gravitatoria entre dos protones es 10^{36} veces menor que la repulsión eléctrica entre ellos. Estamos, pues, ante un nuevo tipo de fuerza, la fuerza nuclear o interacción fuerte, llamada así por ser mucho más intensa que las otras dos interacciones fundamentales conocidas hasta mediados de los años treinta: la fuerza gravitacional y la fuerza electromagnética.

De esta forma se pudieron eludir satisfactoriamente muchas de las dificultades que presentaba el antiguo modelo nuclear basado en protones y electrones. Sólo restaba describir la fuerza que mantiene estable al núcleo. Se sabía, por ejemplo, que para explicar las propiedades del átomo no se requiere introducir esa fuerza nuclear; de ahí que ésta sea perceptible sólo a distancias parecidas al radio nuclear. Por tanto, decimos que la interacción fuerte es de corto alcance, a diferencia de la interacción eléctrica, que es de larguísimo alcance. Se sabía también que la fuerza nuclear debe ser predominantemente atractiva, para así contrarrestar la repulsión eléctrica entre los protones, garantizando la estabilidad del núcleo.

En 1935, el físico japonés Hideki Yukawa utilizó el razonamiento por analogía, tan útil en física, para proponer una teoría fundamental de las fuerzas nucleares. Ya entonces la mecánica cuántica se había aplicado al estudio del campo electromagnético, y la electrodinámica cuántica se hallaba en formación. Según las ideas de la teoría cuántica del campo, la interacción entre dos cargas eléctricas es resultado del intercambio de un fotón entre ellas, que actúa como el mensajero de la fuerza. Por analogía, Yukawa introdujo el mensajero de la fuerza nuclear y pronto se dio cuenta de que este mensajero debería tener masa. Esto, porque sólo entonces la fuerza nuclear resultaría de corto alcance. Propuso, pues, la existencia de una partícula de masa intermedia, llamada por eso

mesón, cuyo intercambio produciría el amarre de los núcleos. No fue sino hasta finales de los años cuarenta que se descubrió esa partícula, que llamamos mesón π o pion y que puede ser neutra, positiva o negativa.

Como el intercambio de los mesones π es más complicado que el intercambio de fotones, la nueva interacción, llamada fuerte, es más compleja que la electromagnética. La interacción fuerte no distingue entre protones y neutrones, pero depende de muchas características de estos nucleones, como se les llama genéricamente a los constituyentes del núcleo atómico. Para entenderla se han realizado miles de experimentos en los cuales se hace chocar un núcleo contra otro. Dado lo complejo de esta fuerza, debe ya ser claro que entender la estructura del núcleo nos enfrenta a un problema formidable: muchos cuerpos, Z protones y N neutrones, interactúan con una fuerza muy complicada y en buena parte desconocida. Se debe resolver entonces la ecuación de Schrödinger para deducir el tamaño, la forma y la orientación de las funciones de onda cuánticas apropiadas al núcleo. Se encuentra, en particular, que los núcleos aislados sólo pueden existir en un conjunto discreto de tamaños y formas. Cada uno de estos estados tiene una energía definida. En otras palabras, el espectro de los núcleos también existe.

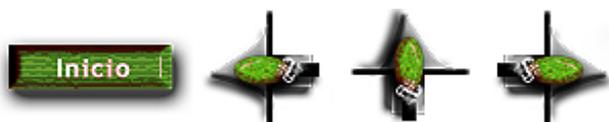
La imagen de un núcleo compuesto por protones y neutrones unidos por una fuerza muy intensa y compleja, deja sin explicar un fenómeno bien conocido y que ya hemos mencionado varias veces: la desintegración beta. Como dijimos, algunos núcleos pueden emitir electrones, o incluso las antipartículas de éstos, los positrones. Ello plantea de inmediato una cuestión obvia: si en el núcleo no hay electrones, ¿de dónde provienen éstos, es decir, de dónde surgen los rayos β ?

Por esta causa se inició el estudio del espectro de energía de estas radiaciones. William Bragg, uno más de los alumnos de Thomson que obtuvieron el Nobel, encontró que las partículas alfa eran emitidas con energías muy bien definidas por los elementos radiactivos. Es decir, las alfas que brotan de un elemento al desintegrarse salen siempre con la misma rapidez. En contraste, Chadwick y luego Ellis y Wooster encontraron que el espectro de la desintegración β es continuo. Es decir, a diferencia de lo que ocurría con las partículas alfa o con el espectro de los átomos, los rayos β no muestran energías características.

Tal resultado planteaba una paradoja y llevaba a conclusiones contradictorias respecto a los núcleos y su decaimiento. Al emitir una β , los núcleos iniciales de un mismo tipo tienen como producto final núcleos residuales que son también idénticos entre sí. Entonces, ¿a qué se debe que la energía de las β no sea siempre la misma? En 1930, Wolfgang Pauli propuso la solución: al mismo tiempo que sale el electrón se emite otra partícula, que es neutra y de masa muy pequeña. De esta manera, la energía disponible para el decaimiento se reparte arbitrariamente entre ambas partículas y el espectro de las β es continuo. Posteriormente, Enrico Fermi desarrolló la teoría apropiada, incorporando esa partícula —a la que llamó neutrino, el neutronicito, en italiano— y una nueva fuerza —a la que llamó la interacción débil, por su pequeña magnitud—. Las partículas beta se crean en el momento del decaimiento, igual que los fotones se crean al ocurrir una transición electromagnética cuando el átomo emite luz.

Con esta nueva teoría, Fermi pudo deducir el espectro continuo de la desintegración beta y también pudo demostrar que, en efecto, el neutrino debe tener una masa casi nula, despreciable, tal y como lo había predicho Pauli. El neutrino, sólo sensible a la interacción débil, es muy difícil de detectar. Por eso, Fermi hubo de vivir el resto de su vida con la esperanza de que los neutrinos en verdad existieran. Las alternativas, como poner en duda el principio de conservación de la energía, eran peores. En 1956, cuando ya Fermi había muerto, se pudieron realizar experimentos para detectar los neutrinos, lo que al fin se logró usando un reactor nuclear de fisión en que el flujo de neutrones y neutrinos es enorme.

Con la aparición de la cuarta fuerza, la interacción débil, se completa el cuadro de la física nuclear básica que es necesario saber para entender los experimentos de fusión fría. Podemos resumir a continuación los conocimientos nucleares necesarios, dejando ya de lado la historia de la física nuclear para concentrarnos en la fusión, tanto fría como caliente.



VI. A MANERA DE RESUMEN

EN EL centro del átomo se encuentra el núcleo, cuyo radio es 10 000 veces menor que el de aquél. Como se ve en la Tabla 1, el radio nuclear es del orden de 10^{-13} cm, distancia que conocemos como un fermi, f , en honor al gran físico italiano. En primera aproximación, al núcleo lo forman dos tipos de partículas, el protón p y el neutrón n , cuyas masas son casi idénticas. El protón tiene una carga eléctrica igual en magnitud a la del electrón aunque de signo opuesto, y el neutrón n , como su nombre lo indica, es neutro, no tiene carga eléctrica. La masa de estas partículas, que genéricamente llamamos nucleones, es aproximadamente 2 000 veces mayor que la masa electrónica. Ya que están cargados y confinados a distancias tan pequeñas, los protones se repelen con una fuerza eléctrica mucho mayor que su atracción gravitacional. Por eso, la estabilidad nuclear no se debe a la fuerza gravitatoria ni a la eléctrica, sino a otro tipo de interacción, la fuerte, que afecta a protones y a neutrones sin distinción.

La magnitud de la interacción fuerte es tal que para arrancar un nucleón del núcleo se requiere de energía un millón de veces mayor que la necesaria para ionizar un átomo. La unidad natural de la energía nuclear no es, como en el átomo, el electrón-voltio eV sino el MeV el millón de electrón-voltios, según puede verse en la Tabla 1. La fuerza nuclear es muy intensa pero actúa sólo a distancias muy pequeñas, de unos cuantos fermis. Este alcance de la interacción fuerte —o distancia a la cual esa fuerza es notoria— hace que los nucleones sólo sientan la acción atractiva de sus vecinos más cercanos. En contraste, la repulsión eléctrica de los protones es de largo alcance, y afecta a cargas separadas entre sí por distancias mucho mayores que el radio del núcleo. En consecuencia, y a pesar de lo intenso de la fuerza nuclear, la repulsión eléctrica llega a dominar cuando el número de protones se hace grande. En efecto, los núcleos con más de 92 protones, es decir más pesados que el uranio, ya no son estables.

Para arrancar un nucleón es necesario darle energía, la llamada energía de amarre. Muchos físicos se dedicaron a estudiar cómo cambia este amarre con el número de nucleones, que llamaremos $A = N + Z$, donde N y Z representan el número de neutrones y protones, respectivamente. Las características de esta función son consecuencia del corto alcance de la fuerza nuclear. Así, para núcleos ligeros, cuya A es pequeña, al crecer A aumenta el número promedio de vecinos cercanos a un nucleón dado y, por lo tanto, cuesta más trabajo arrancar un nucleón a un núcleo con $A + 1$ partículas que a otro con A nucleones. Cuando A crece también lo hace Z , el número de protones. Con él aumenta la repulsión eléctrica y ello se traduce en que, a partir de $A \sim 60$, la energía de amarre promedio de los núcleos pesados decrece con A . Como acabamos de ver, la consecuencia más crítica de este efecto es que la fuerza eléctrica repulsiva acumulada evita que existan en forma natural y estable núcleos más pesados que el uranio.

Consideremos el sistema nuclear compuesto más simple: el formado por un protón y un neutrón, que llamamos deuterón y que es uno de los isótopos del hidrógeno. A primera vista, la masa del deuterón debería ser la suma de las masas del protón y el neutrón. Sin embargo, estas dos partículas están ligadas entre sí y para separarlas se debe invertir una cierta energía, la que hemos llamado de amarre. Según nos enseñó Einstein con su famosa fórmula relativista $E = mc^2$, energía y masa son equivalentes. En consecuencia, el deuterón tiene una masa menor que la suma de las masas de sus constituyentes. Lo interesante ocurre en el proceso inverso, cuando fusionamos un protón con un neutrón; en este proceso se debe liberar una energía igual a la de amarre. Es éste el origen de la ganancia de energía en la fusión nuclear.

Como corolario de lo anterior se puede entender también la generación de energía por medio de la fisión nuclear; es decir; por el rompimiento de un núcleo pesado. Tomemos el ^{238}U , con 92 protones y 146 neutrones. Como dijimos, un núcleo con $A = 238$ está menos ligado que otro con $A = 119$; puesto de otra manera, la masa del ^{238}U es mayor que la suma de las masas de dos núcleos con $A = 119$. Por lo tanto, al romper el uranio en dos se libera energía. El uranio se rompe o se fisiona si contra él chocan neutrones; al agregarle un nucleón, el sistema pierde estabilidad. Como los neutrones no sienten la fuerza eléctrica repulsiva, se acercan sin problemas al núcleo de uranio; éste luego no sólo se rompe en dos pedazos nucleares grandes sino también libera gran energía y emite neutrones, un poco más de dos en promedio por cada fisión. Esos neutrones pueden, a su vez inducir nuevas fisiones de otros núcleos de uranio, y así sucesivamente, con lo que se genera una reacción en cadena. Esta es la base de operación de los reactores nucleares de fisión utilizados para generar energía eléctrica.

La interacción débil también produce la inestabilidad del núcleo al transformar protones en nucleones y viceversa.

Con su acción se recupera el delicado equilibrio de protones y neutrones que requiere un núcleo para ser estable. Si la energía total del sistema transformado es menor que la energía del núcleo original, la desintegración beta es posible y puede entonces ocurrir. Hay dos posibilidades: la desintegración β^+ y la β^- , según convenga desde el punto de vista energético transformar un protón en un neutrón con la emisión de un positrón (o antielectrón), o el caso contrario, en que se emite un electrón. En general, los núcleos inestables ante el decaimiento beta tienden a convertirse en núcleos estables, lo que se logra cuando N es del orden de Z —o sea, cuando el núcleo tiene igual número de protones y neutrones— para núcleos ligeros con $A < 60$, o cuando N es del orden de $1.5 Z$ para núcleos más pesados, pues la acción repulsiva de los protones es entonces más importante.

También es posible inducir inestabilidad nuclear por medio de una reacción nuclear, proceso en que se puede cambiar la composición del núcleo o simplemente perturbarlo energéticamente. Según el estado de excitación que resulte, el núcleo puede emitir rayos gamma o núcleos más pequeños, como las partículas α , para así arrojar su energía sobrante.

Todos los procesos de decaimiento son estocásticos, al azar; en el sentido de que no puede preverse con exactitud cuándo van a ocurrir. Es posible tan sólo medir una vida media, que es el tiempo que tardan en decaer la mitad de los núcleos radiactivos de una muestra. Al haber transcurrido una vida media, los núcleos que aún no han decaído tienen la misma probabilidad de desintegrarse que los que ya lo han hecho. Entonces debemos esperar otra vida media para que la mitad de los núcleos restantes decaiga, y así sucesivamente.



VII. CÓMO DETECTAR LA RADIACIÓN

HASTA aquí hemos descrito en forma somera el núcleo atómico. Discutido cómo decae radiactivamente, cuáles son sus constituyentes y cuáles son algunas de las reacciones que los núcleos pueden experimentar. Todo ello nos permite ya centrarnos en una reacción nuclear en particular, la fusión, a la cual dedicaremos el resto de este libro. Intercalando un poco de electroquímica y otro tanto de calorimetría, podremos ya entender el experimento frustrado de Fleischmann y Pons y por qué causó tanto revuelo.

Muchos son los productos de las reacciones nucleares como la fisión y la fusión. En el caso de la fusión entre núcleos de hidrógeno y deuterio para formar helio, los siguientes son productos característicos: se emite radiación gamma y varios tipos de partículas: neutrones y tritio —el isótopo más pesado del hidrógeno, formado por un protón y dos neutrones—, así como dos isótopos estables del helio, el ^3He y el ^4He . El tritio es a su vez inestable, pues luego de un tiempo se transforma en ^3He , que ya no decae. Haremos aquí un breve recuento de los principios en que se basan las técnicas para medir todos estos residuos. Su presencia y su abundancia relativa serán cruciales para analizar el experimento de fusión fría de Fleischmann y Pons.

Empecemos por las técnicas para detectar los rayos gamma, que como hemos visto son cuantos de radiación electromagnética de muy alta energía, o sea, luz de muy alta frecuencia. Por esta causa, la radiación gamma actúa principalmente sobre las partículas cargadas y, en particular, afecta con mayor probabilidad a los electrones que a los núcleos, pues aquellos al moverse ocupan una zona más grande del espacio. La detección de los rayos gamma se basa en el efecto que ejercen sobre los átomos de algún material cuando envían uno de sus electrones a un estado excitado o lo arrancan del átomo y provocan su ionización. La perturbación causada por este tipo de fotones puede darse de dos maneras: cuando el electrón absorbe toda la energía del cuanto de luz, en lo que se llama un proceso fotoeléctrico, o cuando esto se da sólo en forma parcial y se tiene la dispersión Compton. En este último caso, parte de la energía del fotón incidente se absorbe y se emite un segundo cuanto de luz, cuya frecuencia y dirección obedecen reglas que surgen de la conservación de la energía y del ímpetu, de acuerdo a la teoría de la relatividad.

En el caso de las energías distintivas de la reacción de fusión de hidrógeno y deuterio, el efecto Compton predomina. Sin embargo, puesto que en este proceso la energía que se absorbe no tiene valores bien definidos, es más fácil identificar un rayo gamma por medio del proceso fotoeléctrico, tomando en cuenta la energía que ceden los rayos γ al medio material que los absorbe. Para detectar los rayos gamma usamos, entonces, unos materiales peculiares que se denominan centelleadores que transforman la energía en pulsos de luz visible. Estos centelleos, a su vez, se convierten en pulsos eléctricos por medio de materiales fotosensibles. Su intensidad se puede medir fácilmente, y es proporcional al número de fotones. Este número es también proporcional a la energía cedida al centelleador por el rayo gamma

Un ejemplo real viene al caso; en la figura 5 se ve el resultado de exponer el compuesto **NaI(Tl)**, que es un centelleador; a los rayos gamma provenientes de una fuente radiactiva de ^{137}Cs . Esta radiación tiene una energía de 1.25 MeV —recuérdese, el MeV es la energía típica de un decaimiento nuclear—, y el pico de la derecha en el espectro que aquí se muestra se debe a los rayos γ que sufrieron el efecto fotoeléctrico en el centelleador. En contraste, en la zona de menor energía, que corresponde a la parte izquierda del espectro de esta figura, se muestra la distribución continua de los fotones que sufrieron la dispersión Compton.

En general se observan, pues, los *picos* fotoeléctricos a la derecha y los *hombros* de Compton a la izquierda. Cuando la fuente radiactiva emite rayos gamma de diversas energías y algunas de éstas se superponen a los hombros de Compton, el espectro resultante es una combinación de picos y hombros, que debe discernirse. Según el centelleador; los picos resultan más o menos anchos; en este último caso, tenemos un detector con mayor resolución. En la figura 6 vemos lo mismo que en la anterior; pero usando un detector de GeLi, que resuelve mejor la energía de los rayos gamma.

No toda la radiación γ incidente se detecta, pues estos rayos son muy penetrantes y pueden escaparse. Mientras mayor sea la densidad de electrones del medio, como en el plomo, por ejemplo, serán más eficientes los materiales para absorber la radiación electromagnética; también mientras más alta sea la energía de esta última, la eficiencia para detectar la radiación decrece. Un detector de **NaI(Tl)** que ocupe unos 50 cm³, semejante al empleado por Fleischmann y Pons, posee una eficiencia del uno por ciento.

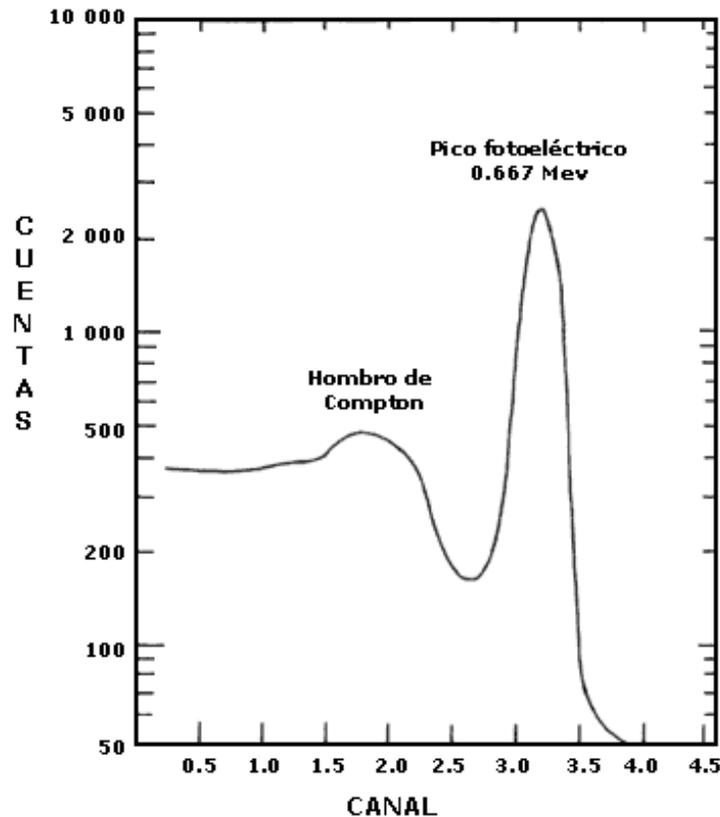


Figura 5. Respuesta de un detector GeLi.

En la fusión nuclear aparecen también neutrones, que al no poseer carga eléctrica son difíciles de detectar. Sólo los choques directos con los núcleos de los materiales del detector los delatan. Como los núcleos son muy pequeños, la probabilidad del choque también lo es y la penetración de los neutrones es grande. Esta probabilidad, sin embargo, aumenta cuando disminuye la energía del neutrón y por eso, para facilitar su detección, a los neutrones se les *modera*, o sea, se reduce su energía forzándolos a atravesar materiales que contengan hidrógeno. Puesto que la masa del hidrógeno es cercana a la del neutrón, las colisiones con él son muy eficientes para reducir la energía neutrónica. Se alcanzan entonces los valores llamados térmicos, cuando la velocidad del neutrón es semejante a la que tiene un átomo en el material detector. Un núcleo captura después a los neutrones térmicos, pasa a un estado excitado y luego decae emitiendo un rayo gamma. Con la técnica de centelleadores que antes expusimos se pueden contar los neutrones. La energía de los neutrones, sin embargo, es muy difícil de medir.

Este método para detectar neutrones tampoco es cien por ciento eficiente. En el experimento de fusión fría, objeto de este libro, se usa un moderador de agua y la captura por núcleos de hidrógeno para formar deuterio. Si tomamos en cuenta la eficiencia para detectar rayos gamma y algunos otros factores geométricos, el método usado por Fleishmann y Pons es capaz de detectar sólo uno de cada diez mil neutrones que pudieran haberse producido. Esta es una eficiencia baja en verdad, lo que constituye un serio problema experimental cuando la actividad nuclear que se desea registrar es débil y comparable al fondo radiactivo natural. Tal radiación de fondo, que se debe tanto a la existencia de núcleos radiactivos en la superficie terrestre cuanto a la continua incidencia de rayos cósmicos, produce por sólo este último concepto un flujo igual a un neutrón por centímetro cuadrado cada segundo.

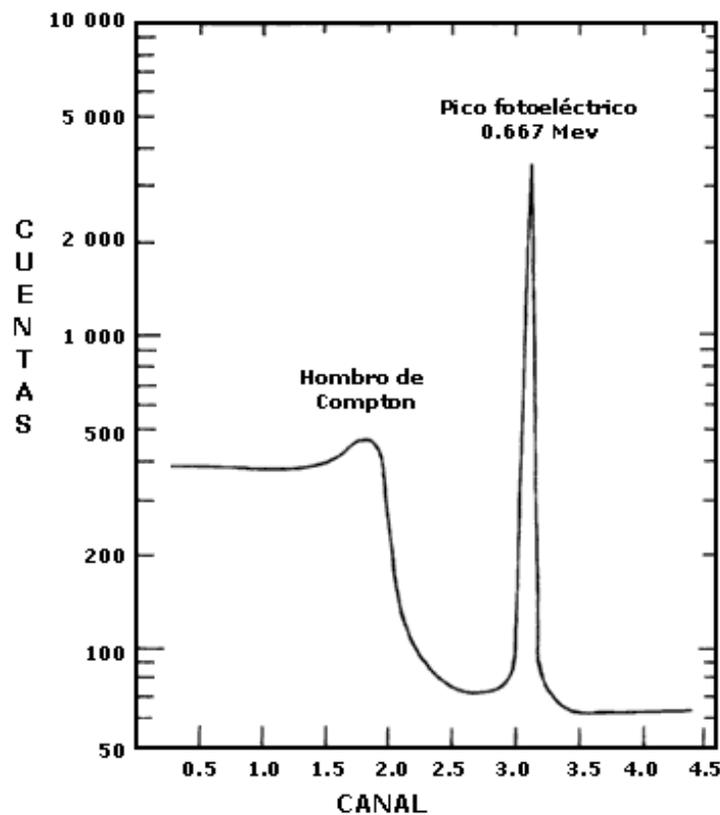
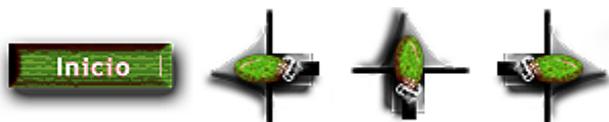


Figura 6. Respuesta de un detector GeLi.

Los demás residuos de la fusión nuclear; el tritio y los isótopos de helio, no pueden escapar del medio material en que ocurre la reacción. Si medimos la cantidad acumulada de estos residuos luego de un periodo de observación, podemos evaluar la actividad nuclear sin muchas dificultades. Para determinar la cantidad de tritio —que, como ya se dijo, es un isótopo del hidrógeno que decae en ^3He al emitir un rayo beta y que tiene una vida media de 12.2 años—, mezclamos el agua con una sal centelleadora y observamos los rayos de luz resultantes; la eficiencia del detector es, otra vez, del orden del 1%. En cambio, la presencia de los isótopos de helio se detecta por medio de una técnica llamada espectroscopía de masas. Se recogen los isótopos ^3He y ^4He . Ambos son estables y no interactúan con otros elementos pues el helio es un gas noble. Luego se les ioniza y sujeta a la acción de un campo magnético. Las trayectorias que siguen dentro de él los iones son distintas según el cociente de su carga a su masa. Los núcleos de ^3He , con carga 2 y masa 3, siguen por tanto una trayectoria distinta a la del ^4He , con carga 2 y masa 4. La técnica no es todo lo segura que quisiéramos, porque otros haces moleculares tienen la misma relación de carga a masa. Por ejemplo, al analizar las muestras del experimento de fusión fría, podría producirse un haz de moléculas triatómicas de hidrógeno doblemente ionizadas, cuya presencia obscurecería nuestros resultados pues este sistema tiene también carga 2 y masa 3 como el ^3He .



VIII. LA FUSIÓN NUCLEAR

LA REACCIÓN de fusión nuclear requiere que dos núcleos se acerquen lo suficiente, para que la fuerza nuclear atractiva se haga sentir y los dos iones se fundan en uno solo con la consecuente ganancia de energía.

Desgraciadamente, los núcleos tienen carga positiva y se repelen eléctricamente; esta repulsión actúa a distancias mucho mayores que el alcance de la interacción fuerte. Como la repulsión eléctrica es proporcional al producto de las cargas que se repelen, el acercamiento es más fácil para los núcleos ligeros, pues llevan menos carga. A fin de conseguir la fusión nuclear debemos usar, entonces, el hidrógeno y sus isótopos. De todas formas, el rechazo entre las cargas significa una fuerte barrera que se opone a la fusión y que de una forma u otra debemos vencer.

Veamos primero cuáles son las posibilidades de que se produzca la fusión en las condiciones habituales de temperatura y presión. Aunque los núcleos normalmente se hallan alejados uno del otro y apartados por la barrera de repulsión eléctrica, la mecánica cuántica permite penetrarla. En otros términos, en el mundo microscópico las barreras no son insalvables debido al principio de incertidumbre y a las propiedades ondulatorias de la materia. En una molécula diatómica de un gas a la temperatura ambiente, por ejemplo, la distancia media entre los dos núcleos es del orden de 10^{-8} cm. Sin embargo, la posición no se puede conocer con precisión absoluta, pues entonces el ímpetu (y con él la velocidad) de los núcleos estaría totalmente indeterminado. Por lo tanto, la probabilidad de que los dos núcleos se encuentren en el mismo sitio y que choquen, no es nula desde un punto de vista cuántico. Sin embargo, este proceso de fusión, que bien podríamos catalogar como "fría", es muy poco probable. Así, las estimaciones más optimistas predicen que para que ocurriera un solo proceso de fusión en un litro de gas de hidrógeno a presión atmosférica y temperatura ambiente (del orden de 20°C), habría que esperar un tiempo ¡mucho mayor que el transcurrido desde el origen del Universo!

Entonces, ¿qué hacer para acelerar el proceso? Conceptualmente, la manera más simple de inducir la fusión es producir, por algún método, núcleos con una energía cinética superior a la energía de repulsión eléctrica, para que así se acerquen mucho unos a otros. Una posibilidad es utilizar aceleradores de partículas, aparatos que con inmensos campos eléctricos y magnéticos pueden lograr que las partículas alcancen altas velocidades. Con estos aparatos se ha podido estudiar no sólo el proceso de fusión sino la estructura interna misma de los núcleos. Sin embargo para producir energía mediante la fusión nuclear; el uso de los aceleradores resulta inoperante, pues para acelerar cada núcleo necesitamos invertir mucho más energía de la que se obtiene de la fusión.

Debemos, pues, buscar otros caminos. Como ya hemos visto, la reacción de fusión es más probable mientras menor sea la carga de los núcleos que se unen, pues entonces la barrera repulsiva es más pequeña. En consecuencia, recurrimos al hidrógeno y entre los isótopos de éste al deuterio o al tritio, cuyas fusiones son muy favorables energéticamente. En la Tabla 2 se ve que Q es positiva, o sea que los productos finales de las reacciones posibles de fusión emergen con energías mayores de las que se impartieron a los núcleos iniciales.

En la Tabla 2 además del valor Q para cada reacción se da, en la tercera columna, la probabilidad relativa con la que puede ocurrir cada uno de los procesos. Así, las reacciones entre deuterones que producen ya sea ^3He más neutrones o tritio más protones se presentan con la misma frecuencia, pero aquella reacción entre dos núcleos de deuterio que produce ^4He y rayos gamma es diez millones de veces menos probable que las dos reacciones anteriores. Por otro lado, las que hemos marcado en la tercera columna como secundarias, también son poco probables, pues es necesario que alguna otra reacción haya tenido lugar antes. En particular; las que incluyen deuterio y tritio, obviamente requieren que este último ya se haya generado.

TABLA 2. Características de las reacciones de fusión nuclear.

<i>Reacción</i>	<i>Valor de Q en MeV</i>	<i>Probabilidad relativa</i>
$d + d \rightarrow ^3\text{He} + n$	3.3	1

$d + d \rightarrow \tau + p$	4.0	1
$d + d \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$	23.9	10^{-7}
$d + r \rightarrow {}^4\text{He} + n$	17.6	secundaria
$p + d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$	5.5	secundaria
$p + r \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$	19.8	secundaria

El uso del deuterio presenta varias ventajas adicionales. La primera, que es muy abundante como energético, pues puede extraerse del agua de mar con tecnologías que dominamos bien. El tritio, por su parte, es más escaso, aunque es un subproducto de las reacciones de fusión. El riesgo radiológico del tritio es pequeño si se le compara con el que implican los residuos de los productos de la fisión, hoy empleada en los reactores nucleares. Por un lado, la vida media del tritio es de 12.2 años y por tanto mucho más corta que la de los productos de fisión, que es de miles de años. Por otro lado, el tritio al decaer emite un electrón con energías pequeñas, comparables a las producidas en un televisor a color; por lo que su penetración en el aire es apenas de unos cuantos centímetros. Sin embargo, el principal riesgo asociado al tritio es que lo inhalamos, pues reemplaza al hidrógeno del agua que hay en el organismo y causa irradiación interna.

La fusión nuclear es una fuente alterna de energía con grandes posibilidades y muchas ventajas sobre otros métodos, incluida la discutida fisión nuclear. Pero en la práctica las cosas no resultan tan simples. Fabricar un reactor de fusión nuclear controlada ha sido el objetivo de muchos años de investigación científica y tecnológica y ha requerido de inversiones astronómicas. Aun así, sigue siendo una gran ilusión. Algunos problemas se han resuelto ya, pero muchos restan aún. En el capítulo próximo discutiremos esos problemas para poner en perspectiva la gran importancia que tendría para la humanidad hallar mecanismos alternativos, más baratos y seguros, de producir la fusión nuclear.



IX. LA FUSIÓN CALIENTE: LOGROS Y DIFICULTADES

EN NUESTRO Sol las reacciones de fusión nuclear ocurren de manera sostenida, sin que sea preciso inyectarle energía del exterior. Que éstas sean reacciones autosostenidas, se debe a que el gas en el Sol se encuentra a muy altas presiones y temperaturas. Así, los núcleos en la estrella chocan con mucha frecuencia y gran velocidad, lo que les permite superar la barrera de repulsión eléctrica que los separa. Algo análogo ocurre en la vecindad de objetos cósmicos, como los pulsares y los cuasares, donde se producen campos electromagnéticos de gran intensidad.

En un gas a alta temperatura, la velocidad promedio de las moléculas es grande. Por ejemplo, en el centro del Sol se tiene una temperatura de 20 millones de grados y la velocidad promedio de las moléculas es de 30 000 km/s, un décimo de la velocidad de la luz. Desde luego, hay algunas moléculas que son más rápidas que otras. Al aumentar la presión y comprimir al gas, acercamos más a las partículas, que ahora chocan con mayor frecuencia. Cuando el gas se halla a muy alta temperatura, los choques son muy violentos y pueden disociar las moléculas en átomos, o aun desprender de éstos a los electrones. Se produce, pues, materia ionizada en forma de gas. Este es el estado en que se encuentra el Sol, y se le conoce como *plasma*, el cuarto estado de la materia.

Para vencer la repulsión eléctrica en un gas formado por una mezcla de tritio y deuterio es necesaria una energía cinética mínima de alrededor de 100 000 eV. Ello implica una temperatura equivalente a mil millones de grados. Como antes dijimos, la temperatura es proporcional a la energía cinética promedio de las moléculas de un gas. Sin embargo, siempre hay moléculas más rápidas que el promedio correspondiente a una temperatura dada. Este hecho permite que a una temperatura considerablemente menor que esos 10^9 K pueda haber una actividad de fusión razonable y suficiente. Así, se ha encontrado que a unos 60 millones de grados la fusión nuclear puede autosostenerse.

El otro parámetro importante para mantener la fusión nuclear sostenida es la cercanía entre los núcleos, pues mientras más juntos se encuentren más probable es que se unan. Los físicos e ingenieros que intentan controlar el plasma usan el llamado parámetro de confinamiento, que es igual al producto de la densidad del gas por el tiempo que la densidad puede sostenerse. La condición mínima para la reacción de fusión autosostenida es que el parámetro de confinamiento sea mayor que $3 \times 10^{14} \text{s/cm}^3$. Si el valor es menor; se requiere inyectar energía al plasma, lo que se logra calentándolo. Si se agrega una energía E , se obtiene del plasma una energía qE , donde q es un cierto factor de ganancia. Cuando q sobrepasa el valor unidad, el reactor se comporta ya como un amplificador de energía.

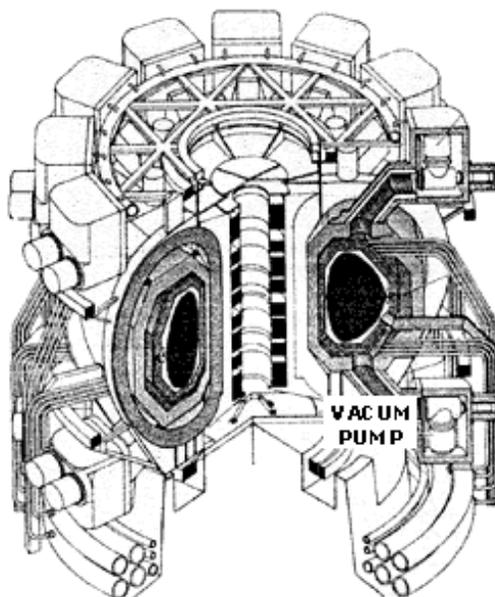


Figura 7. El reactor Tokamak (de las palabras rusas toroid = toroide, kamera = cámara, magnit = imán y katushka = bobina) para controlar la fusión caliente.

El problema tecnológico que plantea la fusión caliente es, pues, formidable: se debe confinar un plasma muy caliente durante un cierto tiempo. Debemos producirlo, calentarlo y todavía confinarlo. Para ello se requieren máquinas enormes, como el Tokamac, que se muestra en la figura 7 y que semeja una inmensa dona. En este aparato, el plasma se confina por la acción de campos magnéticos muy intensos y se le calienta por diversos medios, según su diseño.

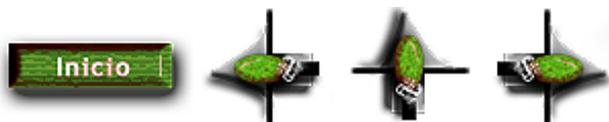
TABLA 3. Los grandes proyectos de la física de plasmas.

<i>Reactor</i>	<i>Lugar</i>	<i>País</i>	<i>Inicio</i>
TFTR	Princeton	EUA	1982
JET	Oxford	CEE	1983
JT-60	Tokio	Japón	1986
MFTF	Stanford	EUA	1986
TORE-SUPRA		Francia	?
T-15		CEI	?

Hoy existen en el mundo sólo seis grandes proyectos destinados a producir la fusión controlada. Cinco son del tipo Tokamac y, como se ve en la Tabla 3, sólo los países más ricos son capaces de emprender acciones tan ambiciosas. En México, como en otros países de menor poderío económico, hay proyectos pequeños. En nuestro país estudian el problema grupos de científicos que trabajan en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares y en la Universidad Nacional Autónoma de México.

El problema planteado por la fusión caliente es de gran magnitud. Sólo tres reactores de prueba operan hoy y sus valores del parámetro de confinamiento no están muy lejos de $3 \times 10^{14} \text{s/cm}^3$, la condición que antes mencionamos para que la reacción se sostenga por sí misma. También el valor de q es cercano a uno, es decir; los reactores producen ya casi tanta energía como la que consumen. Este valor de q , sin embargo, no es suficiente para la operación comercial rentable, para la cual se requiere más bien un valor cercano a 20. Ya se proyecta una nueva generación de reactores, que podrán alcanzar esta meta en la primera o segunda décadas del siglo XXI.

Entre las técnicas del siglo XXI, alternas a los reactores Tokamac, se halla la fusión inducida por láser. En ella, una mezcla de tritio y deuterio se calienta al concentrar varios haces de luz láser sobre una pelotita, de un milímetro de diámetro, que contiene el combustible. La luz ultravioleta, que se obtiene después de pasar la radiación láser infrarroja a través de un cristal perfecto que triplica la frecuencia de la luz incidente, fuerza a los electrones a oscilar y éstos calientan el plasma cuando chocan con sus iones. Al recibir tanta energía, el plasma en la periferia de la pelotita explota y, a causa de la tercera ley de Newton, ejerce una gran fuerza sobre el plasma en el interior de la bolita. Ésta se comprime mucho en consecuencia y las reacciones termonucleares pueden llevarse a cabo.



X. OPERACIÓN DE TOKAMAK

¿CÓMO lograr construir en la Tierra aparatos que semejan pequeños soles, donde la fusión nuclear se autosostiene? Debemos, entre otras muchas cosas, conseguir que en una región limitada del espacio un buen número de iones de deuterio choquen entre sí con la energía suficiente para que se fusionen. En el lenguaje de los plasmas, lo que deseamos es confinar un gas ionizado a muy alta temperatura. Esto se obtiene con campos magnéticos apropiados, como ahora veremos.

Para entender por qué se ha diseñado el Tokamak de modo que semeje una inmensa dona, debemos recordar algunos conceptos básicos del movimiento de cargas dentro de campos magnéticos. He aquí algunos: si el campo magnético es muy grande, la dirección de la velocidad de la carga puede cambiar, pero su magnitud no; en otras palabras, la energía cinética de la partícula se conserva. Si el campo magnético es constante y uniforme, las partículas se mueven a lo largo de una curva helicoidal cuyo eje está en la dirección del campo. Mientras más intenso sea, las partículas giran más rápidamente en órbitas de menor radio.

Hasta aquí el campo magnético ha sido uniforme. Ahora lo variamos un poco en dirección perpendicular a él, para que las líneas de campo se enrollen en círculos, cuyo radio sea muy grande en comparación con las órbitas citadas anteriormente. La partícula cargada recorre ahora una hélice que se curva con el campo magnético, como si fuera un estambre enhebrado alrededor de las líneas del campo. Desde luego, mientras mayor sea la velocidad de las partículas, es decir; mientras más caliente esté el plasma, los campos magnéticos habrán de ser mayores para guiar a los iones.

Vemos que jugando con las diferentes configuraciones espaciales de los campos magnéticos es posible confinar el plasma. En el Tokamak se acomodan una serie de electroimanes anulares para formar una dona hueca, como se ve en la figura 8. En el interior de la dona se genera el plasma, cuyas partículas se ven forzadas a viajar en trayectorias helicoidales a lo largo de las líneas del campo magnético toroidal que han generado los electroimanes.

Desgraciadamente, las partículas del plasma son muy caprichosas y tienden a escaparse del campo magnético, produciendo lenguas de plasma que evitan el confinamiento y producen inestabilidad. El mayor esfuerzo técnico y científico reside, en este momento, en evitar las inestabilidades del plasma.

Para confinar plasmas muy calientes, resulta necesario que los campos magnéticos sean muy intensos. Las bobinas que los producen han de ser por tanto muy potentes. Las mejores que se conocen están construidas de material superconductor; cuya resistencia eléctrica se reduce enormemente si se le enfría a temperaturas muy bajas, del orden de -250 grados centígrados. Los campos magnéticos producidos por estos imanes superconductores son enormes, 100 000 veces más intensos que el campo magnético terrestre. Sin embargo, mantener frías estas bobinas agrega un problema técnico más: para evitar que dejen de ser superconductoras, las bobinas están hechas de alambres huecos por cuyo interior se hace circular helio líquido en grandes cantidades. ¡Un dolor de cabeza más!

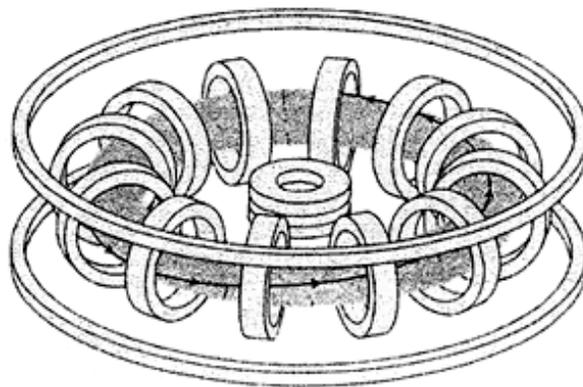


Figura 8. Los electroimanes del Tokamak forman una dona hueca para confinar el plasma de alta temperatura.

En los reactores Tokamac, el campo magnético se varía lentamente en el tiempo, subiendo y bajando de manera cíclica. Esto induce una corriente en el plasma, que así se calienta por efecto Joule, como el que actúa en una plancha eléctrica. El plasma se comporta entonces como el secundario de un transformador de corriente directa y todo depende de esta corriente en el plasma. Ya que el campo magnético no puede ser elevado indefinidamente, la actividad nuclear se debe interrumpir cuando el campo magnético baja para reiniciar el ciclo, disminuyendo así la eficiencia del reactor de fusión. Para evitar esas interrupciones de las reacciones nucleares, y con ellas la pérdida en eficiencia del reactor; hoy se busca producir la corriente en el plasma por medio de un haz rasante de ondas de radiofrecuencia. En este método, el ímpetu de los fotones del haz se transmite a las partículas del plasma, forzando la corriente necesaria.

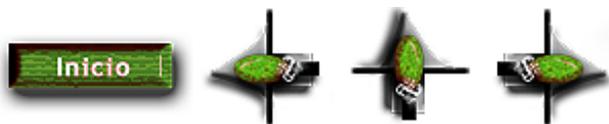
El vaivén del campo magnético produce grandes tensiones sobre los alambres del embobinado. Éstas, que pueden llegar a ser de varias toneladas por centímetro cuadrado en campos magnéticos grandes y variables, producen fatiga mecánica en los materiales. El problema de resistencia de materiales que así se presenta no ha sido aún resuelto.

También el diseño de la cámara que ha de contener el plasma presenta serios retos tecnológicos. La cámara debe mantenerse al vacío, para evitar la contaminación con aire, pues éste enfría el proceso. Además, la camisa que rodea la cámara debe soportar grandes temperaturas, sirviendo de aislamiento térmico entre plasma e imanes pues, como hemos dicho, estos últimos deben mantenerse muy fríos. Estas camisas han de recuperar la enorme energía proveniente del gran flujo de neutrones producidos en la fusión. Deben servir; también, para intercambiar el calor producido en el plasma con un fluido que acarrea la energía térmica para utilizarla, por ejemplo, en mover una turbina y producir energía eléctrica. Por todo ello, el volumen interior de un reactor comercial necesita ocupar varios miles de metros cúbicos.

Las paredes internas de la cámara del plasma se encuentran además sujetas a la fuerte irradiación de partículas cargadas que escapan al confinamiento. No obstante, el principal daño por radiación se debe al flujo de neutrones, que es enorme, cercano a 10^{13} neutrones/cm².s. Por ello, al cabo de un año todos los átomos de la camisa han sido golpeados y desplazados de la red cristalina del sólido que la forma. En consecuencia, se debe cambiar la camisa cada dos o tres años.

Como en los reactores de fisión, en los de fusión también existen problemas de seguridad radiológica. El de los desechos radiactivos es casi despreciable, si se compara con el de los reactores de fisión. El problema reside, más bien, en el gran volumen de tritio que se maneja en los reactores de fusión, que alcanza casi un kilogramo, lo que produce 10^{17} desintegraciones nucleares cada segundo. En efecto, como combustible del reactor de fusión se inyectan cristales fríos de deuterio y tritio a gran velocidad para que lleguen al interior del plasma, donde se ionizan. El proceso no es cien por ciento eficiente y el combustible debe ser recuperado bombeándolo por medio de los sistemas de vacío. El gran flujo de neutrones hace necesario el uso de múltiples sistemas de blindaje. Como ya dijimos, la camisa debe desmantelarse cada dos o tres años. El reactor mismo, al acabar su vida útil, que será tal vez de dos o tres decenios, también debe deshacerse. Todos los elementos que lo formaron podrían quedar radiactivos, con vidas medias tan largas como años, pues han sido activados por neutrones. A pesar de todo lo anterior; el problema de los desechos radiactivos es mucho menor que en los reactores de fisión actuales.

Como podemos ver de esta breve descripción de un reactor caliente de fusión nuclear; los retos tecnológicos son gigantescos. No asombra, entonces, que en cuarenta años de investigación se hayan invertido más de cinco mil millones de dólares para conseguir un reactor de fusión nuclear eficiente y que este proceso de diseño aún no toque fin. Aunque esta línea de trabajo es la más avanzada y la más prometedora, debido a los altos costos y a la complejidad tecnológica se han explorado otros caminos para producir la fusión nuclear. De todos, la fusión fría es la vía más socorrida.



XI. LA FUSIÓN FRÍA ANTES DE 1989

HASTA la fecha el mayor esfuerzo para controlar la fusión nuclear se ha concentrado en el método caliente. Como ya vimos, ésta no es la única línea de investigación activa. Motivados por el alto costo de proyectos como el Tokamac, varios investigadores en diversas partes del mundo buscan otros métodos. Para entender el trabajo de Fleischmann y Pons, y ponerlo en su perspectiva adecuada, es conveniente revisar algunos de tales métodos.

En algunas circunstancias, los núcleos pueden acelerarse de manera natural hasta alcanzar las energías necesarias para lograr la fusión. Así, en el Sol y en la vecindad de objetos cósmicos como los cuasares y los pulsares, los núcleos se aceleran grandemente. Aunque es difícil sacar provecho práctico de estas situaciones, es factible que en la Tierra puedan hallarse campos de fuerza igualmente enormes. En efecto, hace poco tiempo en un laboratorio de la Unión Soviética se encontró que la fractura de algunos sólidos produce enormes potenciales eléctricos que pueden comunicar grandes aceleraciones a los núcleos de hidrógeno inmersos en el sólido. Tal mecanismo, ahora denominado fracto-fusión, ha permitido inducir en forma intermitente la fusión de millones de núcleos de deuterio en cada fractura. La fracto-fusión es todavía una curiosidad académica. Sin embargo, podría ser útil para explicar algunos aspectos del experimento de Fleischmann y Pons.

Otro mecanismo que podría inducir de manera natural la fusión de dos núcleos ya lo mencionamos: se basa en el principio de incertidumbre de la mecánica cuántica, parte de la física que rige el comportamiento de moléculas, átomos y núcleos. Si entre dos núcleos que se repelen colocamos una carga negativa, la repulsión disminuye porque la carga de los núcleos se ve apantallada. Éste es el mecanismo que mantiene unidos a los átomos cuando forman las moléculas, en las que los núcleos se mantienen a distancias promedio del orden de 10^{-8} cm. En particular; la incertidumbre en la separación de los núcleos implica que a veces puedan acercarse mucho y entonces fusionarse. Este mecanismo de fusión fría ocurre en condiciones normales con una probabilidad muy pequeña. De no ser así, el deuterio en nuestro planeta no sería tan abundante, puesto que la fusión ya lo habría agotado al transformarlo en núcleos más pesados. El cálculo más optimista al respecto predice que habría que esperar 10^{37} años para que los núcleos de una de las 10^{22} moléculas de deuterio en una muestra de 1 cm^3 de agua pesada, como la utilizada por Fleischmann y Pons, se fundieran. Según la cosmología moderna, este tiempo es ¡ 10^{27} veces mayor que la vida del Universo!

Otra posibilidad más de obtener la fusión fría, sugerida en 1947 por los físicos rusos A. Sakharov y F.C. Frank, es la llamada fusión catalizada por muones. La distancia promedio entre núcleos a que hicimos referencia en el párrafo anterior disminuye si la masa de la carga intermediaria es mayor. En las moléculas normales la carga intermediaria es un electrón. Por tanto, una manera de acelerar el proceso de fusión fría consiste en sustituir uno de los electrones de la molécula de deuterio por un muon negativo μ^- . Esta partícula, aunque posee la misma carga que el electrón y tiene muchas propiedades idénticas a él, es doscientas veces más masiva. En consecuencia, los núcleos ligados por muones se acercan mucho y la probabilidad de que se fusionen aumenta considerablemente. Así, el tiempo que habría que esperar para que ocurriera una fusión en una muestra de 1 cm^3 de agua pesada a cuyas moléculas se les hubiera cambiado un electrón por un muon, es en este caso pequeñísimo, tan sólo 10^{-31} segundos. El problema, sin embargo, consiste en obtener al mismo tiempo los 10^{22} muones necesarios.

Los muones son partículas inestables cuya vida media, de 2.2 microsegundos, es comparable al tiempo que requiere el proceso de sustitución de electrones por muones en el hidrógeno. Peor aún, su escasez implica que los muones que se utilizarían en un posible reactor de este tipo deberían ser producidos como residuo de reacciones nucleares a altas energías, con un costo energético por muon mil veces superior a la energía que se obtendría de cada fusión.

La sugerencia de Sakharov y Frank permaneció por eso al margen durante una década hasta que, en 1956, el físico norteamericano Luis Alvarez descubrió accidentalmente la fusión en frío inducida por muones en una cámara llena de hidrógeno y deuterio líquidos. En el aparato, que se utilizaba para detectar partículas producidas en reacciones nucleares, aparecían de vez en cuando unos destellos inesperados. Un estudio más detallado llevó a concluir que se trataba de residuos de la fusión de núcleos de hidrógeno con núcleos de deuterio inducida por muones de origen cósmico. Años después, en 1968, al recibir el premio Nobel por otras investigaciones, Alvarez relató su enorme excitación al creer que había descubierto la solución ideal al problema energético mundial. Sin embargo, al poco tiempo se convenció de lo insignificante de la energía que se obtiene en este proceso debido a la reducida vida media de los muones y al escaso flujo de muones cósmicos.

Pensemos por un momento en una mezcla de hidrógeno y deuterio, como la analizada por Alvarez. Veamos la serie de procesos atómicos que constituye la fusión catalizada por muones. En promedio, los muones incidentes son capturados por un protón o por un deuterón en una billonésima de segundo. Una décima de microsegundo después se forman moléculas de hidrógeno-deuterio unidas por un muon. Tres microsegundos más tarde, los núcleos de esas moléculas se funden formando núcleos de ^3He y liberando 5.4 MeV de energía en cada fusión. Sin embargo, para entonces más de la mitad de los muones incidentes ya habrán decaído, pues ha transcurrido un tiempo mayor a su vida media. El 85% de los muones restantes se mantiene unido a los núcleos de ^3He , y sólo resta un 15% para inducir una nueva fusión. Por ello, y buscando alguna manera de aumentar la eficiencia del proceso, Alvarez y otros investigadores realizaron experimentos con deuterio puro. Desgraciadamente, pronto encontraron que este cambio, por sí mismo, no aumenta la tasa de reacción.

Por todas estas dificultades la fusión catalizada por muones había quedado en el olvido. El tema resurgió gracias a las aportaciones de varios científicos soviéticos. En 1966, V. P. Dzelepov demostró que en determinadas condiciones los muones son capaces de producir más de una fusión antes de decaer; especialmente si se eleva la temperatura de la muestra de deuterio. Al año siguiente, el físico teórico E.A. Vesman se percató de que las dimensiones reducidas de una molécula de deuterio unida por un muon ($\text{D}\mu\text{-D}$) permiten la captura de un nuevo núcleo de deuterio, formándose así una molécula triatómica, como se ve en la figura 9, que está tomada de un artículo de Steven Jones, aparecido en 1986. En esta configuración, los núcleos se acercan y la tasa de fusiones aumenta. De existir; este fenómeno ocurriría principalmente a una cierta temperatura privilegiada. En 1977 otros físicos rusos, S.S. Gerhtein y L. I. Ponomarev, descubrieron que el fenómeno predicho por Vesman también debería presentarse en mezclas de deuterio y tritio. De ser así, predijeron que a 260 grados centígrados podría producirse un aumento espectacular (¡por un factor de cien!) en la tasa de reacciones. Dos años más tarde, V. M. Bystritsky demostró que las predicciones de Gerhtein y Ponomarev eran ciertas. Desgraciadamente, pocos meses después el acelerador del laboratorio de Dubna con el que se producían los muones para realizar estas pruebas fue cerrado y esta línea de investigación se vio interrumpida en consecuencia.

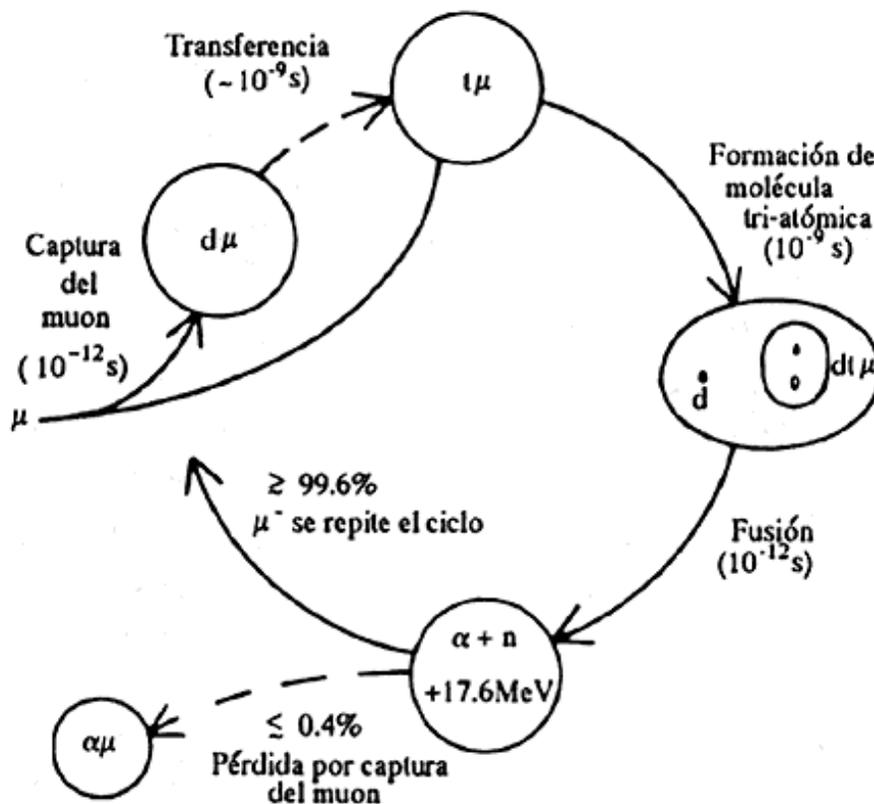


Figura 9. Formación de la molécula triatómica ligada por muones y constituida por dos núcleos de deuterio y uno de tritio.

Los resultados soviéticos recién descritos motivaron al norteamericano Steven E. Jones a realizar una serie de estudios sobre este tema. Utilizando el acelerador LAMPF (Los Alamos Meson Physics Facility) en 1986 encontró que en mezclas de deuterio y tritio comprimido hasta 3 000 atmósferas, los tiempos de captura del muon se reducen tanto que cada μ^- es capaz de catalizar hasta 150 fusiones antes de decaer. Una eficiencia tal significa ganancias de energía de 3 000 MeV por muon, es decir; casi treinta veces la masa del μ^- . Puesto que en los aceleradores actuales se invierten 5 000 MeV por cada muon producido, existe sólo un factor de dos entre gasto y producción de energía. Tomando en cuenta que un reactor rentable requiere un factor de ganancia de 20, vemos que aunque la meta se encuentra ahora más cercana todavía no la alcanzamos.

Existe otra alternativa para conseguir la fusión fría. Consiste en aprovechar la propiedad que tienen algunos metales de absorber grandes cantidades de hidrógeno. En particular, el titanio, el paladio y el platino pueden contener hasta un átomo de hidrógeno por cada uno de sus propios átomos. Una densidad tan alta sólo se podría lograr comprimiendo mucho el hidrógeno. Aunque luego se retractaron, en 1926 los científicos alemanes E. Paneth y K. Peters fueron los primeros en sugerir este método, el cual ya nos acerca más a los trabajos de Fleischmann y Pons, tema de nuestro libro. Antes de describirlos, sólo nos falta hablar un poco de electroquímica y calorimetría.



XII. ENCENDEDORES Y CELDAS ELECTRÓNICOS

LA ELECTROQUÍMICA estudia los procesos químicos estimulados por corrientes eléctricas y viceversa. A esta ciencia debemos, por ejemplo, las técnicas para cromar y niquelar muchos de los objetos que usamos cotidianamente. También a la electroquímica se debe el desarrollo de las baterías eléctricas que utilizamos en nuestros radios y automóviles. Ya que en el experimento de la fusión fría la electrólisis del agua es un elemento básico y también una técnica común de la electroquímica, en este capítulo revisaremos brevemente las ideas básicas de esta importantísima rama interdisciplinaria. Con ellas podremos entender algunos de los conceptos del experimento de Fleischmann y Pons.

Una vez que la celda electroquímica se volvió de uso común, se despertó la curiosidad de describir teóricamente el proceso de transporte de carga entre el cátodo y el ánodo. La naturaleza líquida de la sustancia intermedia, el electrolito, sugirió a Nernst a principios de este siglo un modelo termodinámico basado en el movimiento de los iones. Esta concepción puramente iónica y que habría de perdurar por muchos años, no toma en cuenta, sin embargo, la influencia de los electrodos en el proceso. No fue sino hasta mediados del presente siglo que aprendimos que algunos electrodos son más activos electrolíticamente que otros. Ello nos llevó a aceptar la importancia del transporte de carga en la superficie misma de los electrodos.

Hoy pensamos que la actividad en una celda electrolítica se divide en dos etapas: la *electródica*, que ocurre en la interface entre los conductores eléctricos, los electrodos, y la *iónica*, que se refiere al transporte de carga a través del conductor iónico, el electrolito. La etapa electródica describe el mecanismo por el cual los electrones, que se mueven con bastante libertad en los electrodos, cruzan la interface del ánodo para tener acceso a los iones positivos del electrolito. También describe cómo los electrones cedidos por los iones negativos cruzan la interface del cátodo para cerrar el circuito eléctrico. En ambos casos, el mecanismo dominante se origina en el fenómeno cuántico de penetración de barrera que consiste en que una partícula penetra una barrera de potencial, aun cuando su energía cinética no sea suficiente. Los modelos pertenecen por tanto al área de la química cuántica. La etapa iónica, aunque no menos importante, parece estar bien descrita por modelos termodinámicos que no son sino versiones refinadas de la teoría de Nernst.

La electroquímica, por decirlo así, viajó del electrolito hacia el electrodo, y este viaje no se detuvo en la interface. Hace ya muchos años se observó que el desplazamiento iónico no se restringe al electrolito, ya que los iones son capaces de penetrar en los electrodos y de difundirse en su interior. La capacidad de algunos metales para absorber hidrógeno fue descubierta en 1823 por un ingeniero alemán de apellido Dobereiner. Sin ser electroquímico, encontró que una muestra de paladio con hidrógeno, al ser expuesta al aire, se calienta tanto que puede utilizarse para encender cigarrillos. He aquí el encendedor de Dobereiner. De manera más formal, este contacto entre la electroquímica y la metalurgia fue estudiado en 1866 por el químico inglés Thomas Graham, quien explicó el principio del funcionamiento del encendedor de Dobereiner. El hidrógeno en los metales ha sido estudiado desde entonces, con diversos enfoques, por químicos, físicos, metalurgistas y electroquímicos.

En la actualidad se sabe que los metales de transición, como el paladio, el titanio y el platino, son capaces de absorber ciertas cantidades de los iones ligeros que inciden sobre su superficie. El número de iones que pueden penetrar es una función tanto de la estructura interna del metal como de sus condiciones superficiales. Por ejemplo, cuando el metal receptor está cristalizado y sus átomos se arreglan en estructuras regulares, su capacidad de absorción y la movilidad de los iones que absorbe es mayor. El paladio, por ejemplo, llega a contener hasta un átomo de hidrógeno por cada uno de sus átomos. Se sabe también que la presencia de óxidos y de otros contaminantes superficiales afecta el flujo de iones a través de la interface. Como ejemplo, una hoja de paladio de 1 mm de grueso, sin impurezas superficiales y a temperatura ambiente, puede cargarse de hidrógeno en un par de horas. Este tiempo, sin embargo, podría aumentar hasta por un factor de diez en presencia de óxidos y otros contaminantes superficiales.

Dada la densidad de los metales, absorber un átomo de hidrógeno por cada átomo propio implica una densidad de iones ligeros tan elevada que, para lograr algo equivalente en un gas de hidrógeno, habría que aumentar la presión hasta unas quince mil atmósferas. Sin embargo, las dimensiones de las moléculas que contienen el hidrógeno, los hidruros metálicos, son mayores que las de la molécula de hidrógeno gaseoso. Esto se debe a que las distancias entre los núcleos del metal son mayores, y al aceptar un ion por cada átomo metálico los iones se intercalan, respetándose las dimensiones del arreglo metálico. Dicho de otro modo, en un gas de hidrógeno a presión

atmosférica, la distancia entre sus moléculas es grande pero no así la distancia entre los núcleos de los átomos de cada molécula.

En electroquímica es muy importante evaluar la actividad química inducida por una cantidad dada de electricidad. Una manera de lograr esto es medir la cantidad de residuos producidos en una celda electrolítica. Puesto que las reacciones químicas, trátase de la combinación o de la disociación de moléculas, producen o requieren energía, otra manera de evaluar esta actividad se consigue midiendo la temperatura de la muestra.

La temperatura es una medida macroscópica de la energía cinética promedio de las moléculas de un sistema. Cuando ocurre una reacción química, los residuos pueden tener más o menos energía cinética que el compuesto inicial. En el primer caso hablamos de una reacción química exoenergética y en el otro le llamamos endoenergética. Si la reacción es del primer tipo la muestra se calienta, y si es endoenergética la muestra se enfría. Qué tanto varía la temperatura de la muestra depende del calor que se produce y de la cantidad de materia que contiene. Para medir ese calor se usa la unidad llamada caloría, definida como la energía necesaria para elevar en un grado centígrado la temperatura de un gramo de agua que se encuentre a la temperatura ambiente.

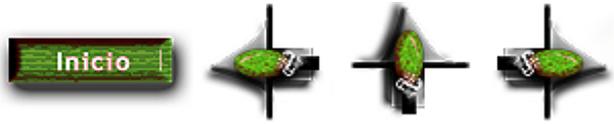
En la Tabla 4 se dan ejemplos de la cantidad de energía calorífica que requieren o ceden las reacciones químicas más importantes en la electrólisis del agua común (H_2O) con electrodos de paladio (Pd). Cuando las reacciones ceden energía, en la Tabla 4 los valores Q son positivos. En las ecuaciones de esta tabla, la flecha indica el sentido en que procede la reacción. Por ejemplo, la primera reacción se refiere a la disociación del agua, proceso en el que se deben invertir 3 800 cal/gr. En el proceso inverso, la oxidación del hidrógeno, esa energía se libera. Como ejemplo de esto último, tenemos las reacciones que ocurren cuando se descarga el paladio en el aire, como en el encendedor de Döbereiner. La disociación del hidruro de paladio, que ocurre al salir el hidrógeno, requiere 4 000 calorías por gramo, es decir; el electrodo se enfría. Sin embargo, en presencia del paladio, el hidrógeno se oxida inmediatamente y forma agua, lo que produce 35 000 calorías por gramo. Entonces, al descargarse una muestra de 100 gramos de paladio que contiene un gramo de hidrógeno, se puede producir en poco tiempo la energía suficiente para elevar la temperatura de la muestra en ¡más de mil grados! En la Tabla 4 presentamos también, bajo la columna denominada *Actividad*, el número de estas reacciones que serían necesarias cada segundo para explicar el experimento de Fleischmann y Pons.

TABLA 4. Algunas reacciones químicas que podrían explicar el experimento de Fleischmann y Pons

<i>Reacción</i>	<i>Valor de Q en eV</i>	<i>Actividad</i>
$\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{O}$		
$\text{H}_2 + \text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{O}$	5.07	2×10^{18}
$2\text{H} \rightarrow \text{H}_2$	4.51	1.4×10^{18}
$\text{H}_2 + 2\text{Pd} \rightarrow 2\text{PdH}$	0.35	20×10^{18}

Idealmente, bastaría un termómetro para medir la cantidad de energía que se produce en una reacción química. En la práctica, sin embargo, para establecer la relación que existe entre esa energía y los cambios de temperatura, se deben tomar en cuenta varios factores. El más importante de ellos es la falta de aislamiento térmico de la muestra. Aislar un líquido resulta virtualmente imposible, pues tanto el recipiente, el soporte y la mesa de trabajo, así como el aire del laboratorio tienen algún contacto térmico con la muestra. Otro factor importante a considerar es que no toda la energía que se libera en la reacción calienta la muestra. Por ejemplo, parte de ella puede convertirse en energía mecánica. Por esta razón se ha creado toda una ciencia, la calorimetría, que estudia las relaciones que existen entre los cambios de temperatura en un sistema y la energía calorífica que se produce en él. La metodología así desarrollada ha sido de gran utilidad no sólo para la electroquímica, sino también para la química, la física, la biología y otras ciencias. Sin embargo, como veremos más adelante, todavía hoy existen muchos aspectos de la

calorimetría de los procesos electroquímicos que no se comprenden bien.



XIII. CRÓNICA DE UNA ILUSIÓN FALLIDA

ESTAMOS ya listos para entender la fusión fría. En los capítulos anteriores hemos revisado los conceptos necesarios para comprender y juzgar los méritos del trabajo de Martin Fleischmann y Stanley Pons (a quienes en adelante citaremos como F&P).

Analicemos pues la historia reciente de la llamada fusión fría. Por la espectacularidad con que los protagonistas principales de estos hechos decidieron dar a conocer su hallazgo, utilizando los medios de comunicación de masas, en este capítulo presentaremos un resumen cronológico tanto de las notas periodísticas como de los artículos científicos que fueron apareciendo posteriormente, incluyendo desde luego el de F&P publicado el 10 de abril de 1989.

Nuestra historia comienza el 23 de marzo de 1989, día en que la Universidad de Utah emite un comunicado de prensa anunciando que en esa institución se había logrado realizar "un experimento simple en el que se observa la fusión nuclear en forma sostenida...". La nota añadía que durante largos periodos se había observado una ganancia en energía calorífica tal que "sólo puede ser atribuida a un proceso nuclear". También se decía que este descubrimiento pronto daría lugar a una nueva tecnología capaz de generar calor y energía a muy bajo costo. La noticia fue comentada el mismo día en el *Financial Times*, periódico de Nueva York, y difundida por numerosas estaciones de radio y por la cadena de televisión CBS.

En una entrevista publicada al día siguiente por el diario *The New York Times*, F&P declararon haber logrado la "fusión nuclear en un tubo de ensaye tan simple que podría ser construido en cualquier laboratorio de química...". Ese mismo día, en el *Dallas Times Herald*, Pons agregó que el instrumento "había funcionado durante más de 100 horas, produciendo más energía que la que consumía, a razón de 4.5 a 1". En ambos comentarios de prensa se ponía énfasis en el enorme contraste que existía entre su experimento y el gigantesco proyecto de la fusión caliente, en el que una inversión de miles de millones de dólares durante cuarenta años de investigación no había logrado siquiera producir tanta energía como la que se consume.

El diario *The Wall Street Journal* del día 24 de marzo informó que, según F&P, había evidencias de que en su experimento ocurría una reacción nuclear, pues además del calor se producían neutrones, tritio y helio. Refiriéndose a la enorme capacidad de su descubrimiento, el día 27 Pons agregó ante el *Wall Street Journal* que en una ocasión el aparato se había calentado repentinamente hasta alcanzar 5 000 grados, ¡destruyendo el laboratorio y dejando un hoyo de diez centímetros de profundidad en el piso de concreto!

Hasta esa fecha, en la prensa sólo se habían publicado descripciones generales del procedimiento utilizado. A este respecto, los voceros de la Universidad de Utah se limitaron a declarar que el experimento era fácil de reproducir; una vez que se sabe como hacerlo... y, en el *New York Times*, Pons agregó que el proceso puede requerir "hasta de diez horas, antes de que se pueda observar la fusión".

La primera reacción de la comunidad científica fue de escepticismo, pues aun en la prensa más seria es posible encontrar a menudo declaraciones de pseudocientíficos que han descubierto alguna máquina de movimiento perpetuo o una cura milagrosa para el cáncer o un remedio maravilloso para que los calvos recuperen su pelo. ¿Sería éste el caso?

Nada era obvio. Martin Fleischmann era un prestigiado científico, miembro de la Royal Society de Inglaterra, distinguida sociedad a la que sólo ingresan los personajes más destacados de la comunidad científica. Stanley Pons, por su parte, era el jefe del Departamento de Electroquímica de la Universidad de Utah, puesto que también implica un nivel académico respetable. Además, dada su especialidad, era de suponerse que su trabajo de calorimetría debería ser lo suficientemente cuidadoso como para ser creíble. Por otro lado, y por no ser especialistas en física nuclear; sus mediciones de los productos nucleares podrían contener alguna falla.

A las pocas horas del anuncio, la demanda de información técnica fue muy grande. La versión preimpresa del artículo de F&P empezó a distribuirse por fax en los laboratorios más importantes del mundo. Para hacer las cosas aún más confusas, simultáneamente empezó a circular por el mundillo científico otro artículo, escrito por el grupo de Steven Jones, en el cual se describía un experimento similar al de F&P y en el que también se observaba una producción importante de neutrones, aunque cien veces menor. Como se recordará, Jones se había ganado un buen

prestigio por sus trabajos sobre temas relacionados con los nuevos mecanismos de la fusión nuclear. Por ello, que un experto en detectar neutrones como Jones confirmara la existencia de actividad nuclear contribuía a que disminuyeran las dudas de muchos investigadores sobre las mediciones de radiaciones nucleares realizadas por F&P.

Ya con la información de carácter técnico a la mano, varios grupos de científicos de todo el mundo, algunos escépticos y otros convencidos, iniciaron la necesaria labor de comprobación. Los resultados no se hicieron esperar. En la primera semana, los laboratorios más importantes de Estados Unidos mostraban reservas. Sin embargo, C. Martin de la Universidad de Texas A&M y T Sztaricskai de la Universidad Kosuth Lajos, en Hungría, se atrevieron a confirmar el exceso de calor y la producción de neutrones.

Por fin, el 10 de abril apareció publicado el artículo de F&P en la revista suiza *Journal of Electroanalytical Chemistry and Interfacial Electrochemistry*. En él se indica que en una mezcla de agua pesada con una sal de litio se había colocado un electrodo de paladio envuelto en una bobina de platino. Al circular una corriente, el paladio se calentaba. A partir de medidas calorimétricas, los autores decían haber obtenido ganancias de calor de entre 5% y 111%, durante periodos de más de 120 horas. El método de F&P para medir la producción de calor consiste en mantener su celda electrolítica en un baño de agua a temperatura fija. La producción de energía calorífica en la celda por un periodo determinado de tiempo produce una elevación de la temperatura interna respecto a la temperatura del baño. La relación que existe entre esa temperatura y la energía calorífica cedida a la celda había sido determinada, previamente, calentando con una resistencia eléctrica el electrolito de la celda.

Un dato importante sobre el experimento de F&P es que en él se utilizó un método "abierto", en el cual tanto los electrodos como el electrolito y los gases que resultan de su ionización se encuentran en contacto con la atmósfera del laboratorio. Esto elimina las dificultades de los sistemas cerrados en que los gases deben ser recombinados, aunque se desprecia la posible influencia de los contaminantes externos. Como veremos posteriormente, éste podría ser el origen de varios de los efectos en el experimento de F&P que aún no se entienden.

El artículo científico de F&P contenía también un informe sobre los residuos de reacciones nucleares, concretamente, los neutrones y el tritio. Como se recordará, los neutrones no pueden ser detectados directamente. Por tanto, F&P utilizaron un método que se basa en observar los rayos gamma que se producen cuando los neutrones se funden con los núcleos de hidrógeno del agua que rodea su celda. El artículo incluye una gráfica que muestra la región del espectro de energía de los rayos gamma correspondiente a los 2.2 MeV como se ve en la figura 10. También mencionan que para evaluar la producción de neutrones habían tomado en cuenta el fondo de radiación natural de su laboratorio. Con este procedimiento, estimaron que en su celda había una producción de 10^4 neutrones por segundo. En todo caso, algo parece andar mal con los datos de F&P. Por ejemplo, estos autores no observan el hombro de Compton, que siempre está presente, y que hemos indicado con una línea punteada en la figura 10.

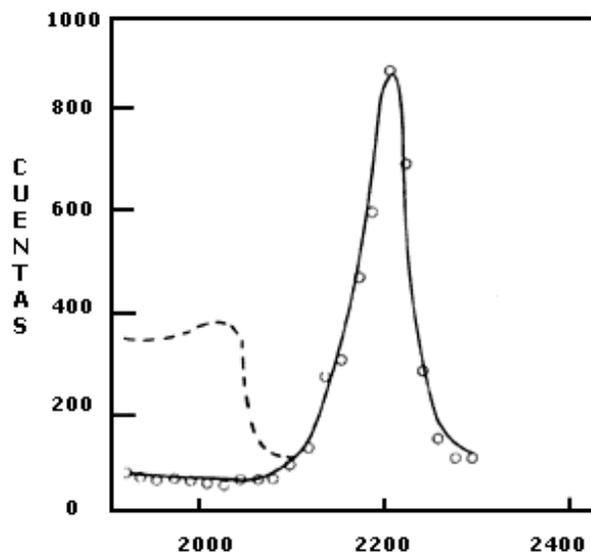


Figura 10. Espectro de energías de los rayos gamma observados en el experimento de Fleischmann y Pons. La línea punteada corresponde al hombro de Compton, que no fue observado por aquellos autores.

La cantidad de tritio en el electrolito fue evaluada utilizando el método conocido como centelleo líquido. Éste consiste en disolver una determinada cantidad de material centelleador en la muestra líquida que se desea estudiar para, posteriormente, contar los destellos luminosos que producen los rayos beta emitidos por el tritio presente. El resultado que presentan F&P corresponde a una tasa de producción de tritio también del orden de 10^4 núcleos por segundo.

En su conclusión, F&P hacen notar la enorme inconsistencia entre la radiación nuclear; que correspondería a una ganancia de energía calorífica del orden de un watt y a 10^{14} reacciones por segundo, con su medida de los productos de reacciones nucleares que es ¡diez órdenes de magnitud menor! Por ello, concluyen que algún proceso nuclear hasta ahora desconocido podría estar ocurriendo. Debe recordarse que los resultados de Steven Jones, que circularon simultáneamente a través del fax por el mundo, indicaban que esa inconsistencia entre energía calorífica y actividad nuclear podría ser incluso cien veces mayor que la encontrada por F&P.

Cuando apareció la versión impresa del artículo técnico, se agregó una fe de erratas en la que se hacen notar nueve errores, que vale la pena mencionar. Primero, F&P lamentan profundamente la omisión "inadvertida" de su coautor, Mr. Hawkins. Uno se pregunta, ¿qué habría pasado con M. Hawkins si el experimento de F&P hubiese merecido el premio Nobel? Las otras ocho correcciones incluyen un error tipográfico y siete aclaraciones sobre la magnitud y naturaleza del fondo de radiación considerado.

Respecto a la rapidez con que el artículo de F&P fue publicado, el semanario norteamericano *Time* del 17 de abril comenta que la editorial suiza adelantó la publicación del artículo que había sido aceptado sólo 17 días antes, mientras que la revista científica inglesa *Nature*, de mucho mayor prestigio, se había negado a publicar los resultados de F&P. En su nota periodística, *Time* agrega que las ideas originales del famoso experimento habían sido concebidas cuatro años antes, cuando Fleischmann visitaba la Universidad de Utah donde Pons trabajaba. Según el relato, "... luego de largas discusiones sostenidas durante caminatas en el campo, habían decidido realizar una serie de experimentos de prueba en la cocina de la casa de Pons... ." Así, en las noches y durante los fines de semana, entre 1985 y 1989 llegaron a invertir cien mil dólares de sus propios recursos para realizar un gran número de pruebas.

Durante el resto del mes de abril continuaron las comunicaciones "científicas" en los periódicos sobre experimentos similares al de F&P. Concretamente, A. J. Appleby y S. Srinivasan de la Universidad de Texas A&M, y R. Huggins de la Universidad de Stanford, dijeron que observaban un exceso de calor cuando utilizaban calorímetros abiertos. Los resultados negativos fueron menos favorecidos por la prensa.

Mientras tanto, ni la ciencia ni la prensa mexicanas permanecían al margen de estos acontecimientos. El 20 de abril, la Gaceta de la UNAM anuncia en primera plana que investigadores de la Facultad de Química de la UNAM habían corroborado, sin lugar a dudas, la existencia de la fusión fría. Al día siguiente, el Instituto de Física de la misma institución informa que la escasa cantidad de radiación que se observa, similar a la encontrada por F&P, sólo debe ser considerada como una cota superior; pues se encuentra en el límite de sensibilidad del equipo utilizado. Como es natural, esta noticia negativa no recibe tanta publicidad, pues sólo se publica una semana después, el día 27, en la página II de la misma *Gaceta*.

Volviendo al panorama internacional, la prestigiada revista inglesa *Nature* publicó en su número del 27 de abril el artículo escrito por Steven Jones y siete colaboradores, donde se presentan las mediciones de producción de neutrones realizadas con un equipo cien veces más sensible que el utilizado por F&P. Curiosamente, los resultados de Jones indican que la cantidad de neutrones detectada es cien veces menor que la de F&P. Es decir; esta medida, aunque más precisa, ¡también cae dentro de los límites de sensibilidad del equipo de detección! Dejando de lado estas discrepancias, la evidencia encontrada tanto por F&P como por Jones y sus colaboradores, mostraba que el nivel de radiación nuclear encontrado era demasiado bajo comparado con lo que cabría esperar para alcanzar una producción de calor como la que se decía haber observado. Al respecto, el 31 de marzo la revista estadounidense *Science* publica las opiniones de ambos grupos. Según Jones y colaboradores, es indudable que la fusión fría existe,

pero es tan escasa que nada tiene que ver con lo observado por F&P. Rafelsky, físico nuclear de la Universidad de Arizona y coautor de Jones, añade que, de no ser así, F&P deberían haber muerto, ya que habían estado expuestos durante mucho tiempo a muy altos niveles de radiación. Por su parte, F&P continuaban insistiendo en que se trataba de un nuevo proceso nuclear.

El primero de mayo, en una reunión de la *American Physical Society* que tuvo lugar en Baltimore, N. Lewis del Instituto Tecnológico de California presentó uno de los trabajos más extensos con resultados negativos: ni calor; ni radiación aparecían luego de cientos de horas de observación. Sin embargo, el 9 de mayo, ahora en una reunión de la *American Electrochemical Society*, se discutieron más trabajos con resultados positivos. Se aprecian ya los síntomas de un problema latente y hasta cierto punto olvidado: la rivalidad entre físicos y químicos. En este caso, los químicos, que se sienten descubridores de un fenómeno nuevo, acusan a los físicos de no saber suficiente electroquímica como para realizar un simple experimento de electrólisis. Tal crítica es parcialmente validada por quienes hacen notar que Steven Jones, un físico, utiliza como electrolito una mezcla de ocho sales metálicas, mientras que a F&P les bastó sólo una. Por otra parte, surgen las críticas en la comunidad de los físicos sobre la poca sensibilidad de los métodos utilizados hasta ahora por los químicos, incluidos F&P para detectar la radiación. ¿Quién tiene razón?

En México, a partir de abril, nueve grupos experimentales de diversas instituciones de investigación empezaron a reunirse regularmente para evaluar su progreso y comparar resultados. Hay de todo. Unos dicen no observar nada mientras, en un momento dado, hay quien anuncia detectar ¡diez mil veces más neutrones que F&P! Así, los meses que siguen sólo sirven para aumentar las dudas al respecto, a tal grado que, utilizando un juego de palabras en inglés, a la fusión fría en lugar de *cold fusion* se le comienza a denominar "confusión".

Del 23 al 25 de mayo de 1989 se realiza en Santa Fe, Nuevo México, el primer Congreso Mundial sobre Fusión Fría. Hasta entonces los resultados sólo se habían presentado ya en conferencias de prensa ya en sesiones extraordinarias de congresos dedicados a tratar otros temas. En esta reunión se presentan los resultados tanto positivos como negativos obtenidos por diversos grupos. En cuanto a la actividad nuclear; el resultado positivo más notable fue el de Kevin Wolf y sus colaboradores del Laboratorio Nacional de Los Alamos. Wolf informa sobre medidas de tritio que corresponden a una actividad nuclear 10^6 veces mayor que la de F&P. Sin embargo, el mismo grupo acepta que la producción de neutrones detectada por ellos es aun menor que la de F&P. En todo caso, la medida de Wolf resulta ser 10^4 veces menor a la requerida para explicar el calor observado por otros grupos. El resto de los resultados positivos se concentró en los efectos calorimétricos. Entre los resultados negativos más notables se encontraban los de Lewis, quien realizó una gran variedad de medidas. Otro caso notable fue el de Moshe Gai, de la Universidad de Yale, quien posee uno de los detectores de neutrones más sensibles del mundo. Gai no encontró neutrones ni siquiera al nivel observado por Jones, aunque usaba un equipo cien veces más sensible.

Todo parecía indicar que si se trataba de un fenómeno nuclear nuevo, éste debería ser insólito. Con ese fenómeno seríamos capaces de producir energía sin dejar rastros conocidos. El mecanismo también permitiría que ocurriera la reacción que produce tritio pero la que genera neutrones, a pesar de que toda la evidencia anterior de la física nuclear indica que ambas reacciones son igualmente probables. El ingenio teórico no se hizo esperar y, a pocos meses del anuncio de F&P, se sugirieron varios modelos para explicar estos efectos. Sin embargo, ninguno de estos modelos descansaba sobre bases sólidas pues todos implicaban renunciar a principios hasta entonces considerados como fundamentales. Peor aún, si esas teorías se aplicaban a situaciones bien conocidas, se predecían fenómenos que no guardan relación alguna con el mundo en que vivimos. Cabía, claro está, la posibilidad de que todo fuera consecuencia de una serie de errores experimentales, pero ¿cuáles podrían ser éstos?

En el terreno de la política, la fusión fría iba ganando notoriedad rápidamente. En abril, la Cámara de Representantes de los Estados Unidos discutía la posibilidad de otorgar un apoyo extraordinario e inmediato a F&P para que continuaran sus experimentos. En forma independiente, el gobierno de Utah otorgó 5 millones de dólares a F&P para fundar un Instituto de la Fusión Fría. Ante tal situación, el Departamento de Energía de los Estados Unidos formó una comisión con 23 científicos del más alto nivel para que elaborara un informe sobre este tema a la mayor brevedad posible. El Grupo de Estudio incluía a físicos y a químicos, entre ellos a un premio Nobel, Norman Ramsey. En los últimos capítulos de este libro comentaremos los hallazgos de este comité y el estado actual de la fusión fría. No podremos evitar las moralejas que se desprenden de un tema tan controvertido.

Inicio



XIV. CRÍTICAS DEVASTADORAS

EN EL momento de escribir estas líneas han transcurrido ya dos años desde el espectacular anuncio de F&P. La fusión fría ha pasado de moda, y la prensa se dedica, como de costumbre, a otras noticias que mantengan atento y a veces admirado al público. Pero, ¿qué pasó con la fusión fría? En este capítulo haremos una revisión crítica del tema desde un punto de vista técnico, y en el siguiente un análisis del origen y del efecto que este tipo de sucesos ejerce en la ciencia.

En el experimento de F&P, lo más importante es la gran ganancia de energía calorífica que se dice haber observado. Como ya vimos, algunos grupos de investigación confirmaron este resultado; no obstante, un número mucho mayor de investigadores declararon que el efecto no se observaba. Algunos resultados positivos se presentan todavía hoy en forma esporádica. Podemos concluir entonces que si el fenómeno en verdad se produjera, ocurriría de manera intermitente.

Un proceso que tal vez fuera intermitente es el que mencionamos a continuación. Al disociarse los gases, la energía se acumularía lentamente y luego, por la acción catalítica de los electrodos, esta energía podría transformarse rápidamente en calor. Tal explicación, basada en reacciones químicas de recombinación que ocurrirían entre los gases internos y externos y los electrodos y el electrolito, se sugiere porque todos los experimentos en que se observan resultados positivos son de calorimetría abierta. El Grupo de Estudio del Departamento de Energía de Estados Unidos hace notar este hecho en su informe final, e insinúa la posibilidad de encontrar una explicación simple al fenómeno. Aunque la magnitud del calor observado por algunos grupos es incompatible con la existencia de reacciones puramente químicas, dicha interpretación tampoco ha podido descartarse de manera categórica.

Una ganancia energética como la que F&P dijeron hallar; es el argumento más sólido en favor de una interpretación nuclear. Sólo con la presencia de reacciones nucleares podría entenderse una producción tan grande de energía. Sin embargo, ni F&P ni otros grupos han encontrado las cantidades necesarias de residuos nucleares que permitirían explicar dicha ganancia. De hecho, el que los dos químicos no hubieran muerto a causa de una sobreradiación, es la mejor evidencia de que no hay procesos nucleares en su experimento. En todo caso, las evidencias de actividad nuclear presentadas por F&P han sido duramente atacadas en la bibliografía especializada. Revisaremos ahora algunos de estos argumentos.

La crítica más dura se refiere a la forma en que F&P midieron los neutrones. Poco después de la aparición del artículo técnico en la revista suiza, Petrasso envió una carta a la revista *Nature* donde hace notar varios errores en la medición. Concretamente, se refirió al espectro de rayos gamma que presentaron F&P. Petrasso indica tres problemas. El primero es que sólo se ilustra una fracción del espectro; el segundo es que, a pesar de que la región mostrada cubre de sobra la zona del hombro de Compton, en el espectro no hay ni trazas de éste, como ya lo hicimos notar al discutir la figura 10. Un tercer problema reside en las características del detector utilizado por F&P. La anchura del pico que, en principio, correspondería a la captura de neutrones por hidrógeno, es muy inferior a la resolución del detector; que se conoce bien. De todo ello, Petrasso concluye que lo observado por F&P sólo puede deberse a un error instrumental.

F&P respondieron, en la misma revista, mostrando el espectro completo que habían obtenido. Basados en este nuevo espectro, Petrasso y sus colaboradores hicieron notar que F&P no sólo habían cometido un grave error de calibración en la energía de sus rayos gamma, sino que al mencionado espectro ¡le sobran picos! Como resultado de este intercambio de cartas en la revista *Nature*, F&P reconocieron al fin sus errores y se retractaron públicamente durante una conferencia en California en junio de 1989.

A partir de entonces, otros grupos declararon haber observado cantidades variables de neutrones correlacionados ya sea con la electrólisis del agua pesada o con otros mecanismos electrolíticos. Sin embargo, pocos de estos grupos lograron reproducir los resultados de F&P y, mucho menos, publicarlos. De hecho, el número de artículos técnicos con resultados negativos fue mayor que los que indicaron una presencia abundante de neutrones.

De esta controversia surgió, no obstante, algo positivo: la integración de grupos de investigación que conjuntaron escépticos y optimistas. El ejemplo más notable es la colaboración de Steven Jones con Moshe Gai. Los resultados preliminares de este grupo indican que la producción de neutrones podría ser incluso menor que la encontrada originalmente por Jones. Sin embargo, la precisión de los nuevos experimentos de este grupo está limitada por la

existencia de ciertos fenómenos naturales denominados lluvias cósmicas, producidas por radiación extraterrestre de muy alta energía que incide en la atmósfera. Cuando esto ocurre, se produce una verdadera avalancha de neutrones, que son difíciles de distinguir de los neutrones que se podrían generar en la fusión fría. Para resolver el problema F&P propusieron otra medida de la actividad nuclear durante la fusión fría: la producción de tritio evaluada a través de la técnica de centelleo líquido. Su resultado hizo surgir también muchas dudas. Hay quienes opinan que lo observado se debe a una actividad química que ocurre al mezclar el electrolito, que contiene sales metálicas, con el centelleador. Otros investigadores opinan que aun aceptando que lo que se observa es en verdad tritio, no se han tomado en cuenta todas las posibles fuentes de contaminación externa.

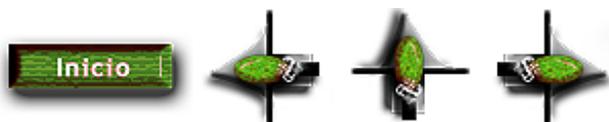
En cuanto a la primera objeción, la baja sensibilidad del método empleado por los investigadores F&P requiere un delicado proceso previo de destilación y concentración. Para utilizar la técnica de centelleo líquido, es necesario usar muestras de muy alta pureza. Así se asegura que, al agregar un compuesto orgánico como el centelleador; no ocurran reacciones químicas y por tanto que no se emita luz que confunda la medición. Del trabajo original de F&P no se tienen los detalles suficientes como para asegurar que estos dos químicos se hubieran tomado la molestia de preparar sus muestras como es debido.

En cuanto a la segunda objeción sobre las posibles fuentes de contaminación externa, cabe hacer notar que el agua natural contiene pequeñas cantidades de tritio. En el agua pesada hay aún más tritio que en el agua común. Dado que este isótopo del hidrógeno decae con una vida media de doce años, el contenido de tritio en las muestras de agua pesada varía mucho, dependiendo de la edad de la muestra. Entonces, para realizar un experimento como el de F&P se debe evaluar el contenido de tritio en la muestra antes y después de la operación. En otras palabras, no es válido evaluar un posible aumento en el contenido de tritio en una muestra cualquiera de agua pesada, ya que ese contenido varía de un caso al otro. El trabajo de F&P tampoco aclara este punto.

Muchos argumentaban que los grupos cuyos resultados eran negativos desconocían el tratamiento específico que había que darle a los electrodos. Sin embargo, pronto se descubrió que los pocos grupos de investigación que decían haber observado el fenómeno de la fusión fría, utilizaban electrodos de forma arbitraria, sin tratamiento previo, e incluso se daban casos en que el electrolito no existía.

Todo ello apuntaba a que los resultados de F&P no eran reproducibles. En apariencia, ciertos factores desconocidos hacen que sus resultados no sean sistemáticos. Así, según el informe del Grupo de Trabajo del Departamento de Energía, cuando sus integrantes se ofrecieron a visitar los laboratorios para corroborar la existencia de la fusión fría, nunca recibieron una invitación. Y cuando llegaron de improviso a un laboratorio donde se decía haber observado el fenómeno, no los dejaban presenciarlo. Este misterioso recelo, propio sólo de las firmas tecnológicas que intentan guardar sus secretos, provocó un mayor escepticismo de la comunidad científica y del público en general.

Las críticas anteriores resultaron demoledoras. El interés en la fusión fría producida en experimentos como el que causó el escándalo en 1989 ha decaído mucho. Hoy sólo queda uno que otro aspecto por aclarar. Entre estos puntos se encuentra el relativo a la cantidad de tritio. Algunos experimentos recientes siguen detectando un aumento anormal de este isótopo del hidrógeno. Aunque se han tomado en cuenta las posibles fallas antes indicadas y se han hecho analizar las muestras en laboratorios ajenos, sí se ha detectado una ganancia de tritio. Ésta es, por desgracia, más de 10 000 veces menor que la ganancia necesaria para explicar el calor generado en la celda electrolítica de F&P. Peor todavía, no parece existir correlación alguna entre los experimentos que producen tritio y los que generan calor. De todas formas, observar una ganancia de tritio en un proceso químico tan simple es insólito, y se justifica que la investigación sobre este punto continúe. Este es uno de los escasos temas científicos que el escándalo de la fusión fría ha dejado abierto. Empero, en cuanto a las relaciones de la ciencia con la sociedad, muchas más cuestiones han quedado sin respuesta.



XV. MORALEJA DE UN EXPERIMENTO FRUSTRADO

PARA el futuro de la ciencia de la fusión, sea ésta fría o caliente, el espectacular anuncio de F&P resultó muy desafortunado. En el medio científico, en el político, en el de las grandes empresas y en el público, tal anuncio provocó muchas expectativas infundadas. Desde el punto de vista de la comunidad científica el daño es muy grande. A los investigadores que buscaban en forma seria alternativas a la fusión caliente, se les ha satanizado con el estigma de F&P. La sociedad, por su parte, durante mucho tiempo se mostrará escéptica ante cualquier logro en este campo. Por espectaculares que sean los avances para producir y controlar la fusión, en el ambiente flotará siempre la esperanza de que por ahí un mecanismo simple, que puede llevarse a cabo en un frasco de vidrio cualquiera, seguramente habrá de existir. Las consecuencias de estas actitudes serán muy peligrosas para proyectos tan serios como el de la física de plasmas, en el que se ha invertido tanto tiempo y dinero. Como un daño menor; aunque no insignificante, notemos también que aclarar los hechos mencionados y no demostrados por F&P costó un enorme esfuerzo. Se estima que sólo en los Estados Unidos la inversión por este concepto superó los quince millones de dólares.

La ciencia organizada sobrevive gracias al apoyo de la sociedad, que a cambio le exige que satisfaga muchas necesidades, tanto materiales como culturales. Tales beneficios son producto del esfuerzo de un gran ejército de científicos y técnicos que investigan sin cesar los mecanismos de la naturaleza y que aplican su ingenio para mejorar; al menos en el corto plazo, la calidad de la vida humana. Como un proceso lento y constante, este progreso surge gracias a las pequeñas aportaciones de muchos hombres y mujeres de ciencia. Sin embargo, de vez en cuando aparece alguien que, con un poco de suerte y mucho talento, encuentra la manera de dar un gran paso hacia adelante. Así, en los anales de la ciencia se han grabado los nombres de Demócrito, Galileo, Newton, Faraday, Maxwell, Einstein y madame Curie, por mencionar sólo algunos grandes de la física. En el corazón de todo científico existe latente la esperanza de realizar un hallazgo notable, para que su nombre quede grabado para siempre en la historia del conocimiento. Estos oasis en el desierto no son, por desgracia, comunes. Por eso, los científicos deben cuidarse de los espejismos que a menudo se les presentan. A estas alturas, en que todo parece indicar que el experimento de F&P es tan sólo un espejismo y que otra gran ilusión ha quedado en pie, es interesante hacerse la pregunta, ¿qué hace la ciencia para diferenciar espejismos de realidades?

La ciencia depende de la sociedad. Esto la obliga a establecer mecanismos que filtren la información científica. En particular; es preciso que se evite la publicación de informes escandalosos sobre hallazgos espectaculares. Si los científicos anunciaran cada día resultados impresionantes que luego resultaran falsos, nadie tomaría en serio a la ciencia organizada. Por ello se han establecido reglas e instituciones de carácter internacional que intentan garantizar la veracidad de los descubrimientos científicos. Se ha establecido una censura previa, un proceso de arbitraje al cual se sujetan todos los trabajos científicos antes de ser publicados. Así, todo artículo científico que se publica en una revista especializada ha sido antes revisado en forma anónima por uno o varios investigadores de reconocido prestigio y expertos en el tema del artículo. Los que forman parte de la comunidad científica han acordado, de manera implícita, publicar sus resultados sólo en aquellas revistas que se apegan a este procedimiento. La comunidad científica establecida fuerza a sus miembros a cumplir este compromiso por medio de evaluaciones periódicas y sistemáticas. Aquellos científicos que no son capaces de comunicar sus resultados a través de estas publicaciones con arbitraje, pierden su lugar en la comunidad.

Los artículos científicos sólo dan cuenta de las nuevas aportaciones. Quien investiga un problema científico está, por tanto, obligado a enterarse de lo que otros hombres y mujeres de ciencia han logrado avanzar en el tema de su interés. Por el nivel de especialización que hoy se da en la mayor parte de la ciencia, para convertirse en investigador una persona tiene que estudiar muchos años, alcanzar la licenciatura, la maestría, el doctorado e incluso pasar algunos años de entrenamiento posdoctoral.

Las reglas de la comunidad científica, en lo que a publicaciones se refiere, son efectivas. No obstante, y como toda estructura humana, tienen sus defectos. El más obvio es el poder del árbitro, que puede llegar a ser inmenso. Puesto que esta labor recae en científicos con mucho prestigio que también estudian el mismo tema, el árbitro es en principio un rival del autor. El árbitro tiene su propio punto de vista, y podría ser parcial al emitir un juicio subjetivo sobre la validez de un cierto resultado. Ser amigo o enemigo del árbitro puede significar para un autor que sus trabajos vean o no la luz pública. Aunque las revistas ofrecen siempre algún mecanismo de apelación, la mayoría de los científicos aceptan esta situación y tratan de adaptarse a ella basados sólo en la supuesta ética de los árbitros. Es interesante hacer notar que las arbitrariedades son más bien la excepción que la regla.

Existe, sin embargo, una situación que podría ser importante en el caso de F&P. ¿Qué pasa cuando se trata de un descubrimiento verdaderamente revolucionario? ¿Debe tener un árbitro el poder de entretener una publicación importante, propiciando el plagio? En cierta medida, sí.

En el caso de descubrimientos científicos cuya aplicabilidad pueda ser inmediata se debe, además, considerar un nuevo factor. Se trata de elegir entre publicar o patentar. Si bien la máxima retribución en la vida de un científico debiera ser el reconocimiento de sus colegas y, dado el caso, del público en general por su obra, una patente extraordinaria puede resultar en beneficios menos altruistas pero más tangibles. Se trata pues de una decisión bastante seria. Pocos conocemos al inventor de instrumentos tan útiles como, digamos, la fotocopidora, pero es seguro que ese personaje recibió por su aportación una recompensa económica mucho más importante que el premio Nobel.

Es muy posible que todos estos factores hayan sido importantes en la decisión de F&P. Citar a la prensa no especializada para informarle los resultados de su famoso experimento significaba violar los procedimientos ortodoxos. Por supuesto, así evitarían que un árbitro tratara de retrasar la publicación de un hecho ya tan difundido por otros medios. También se sabe que F&P intentaron patentar ciertos aspectos de su descubrimiento. Utilizaron con frecuencia este argumento cuando muchos grupos en el mundo declaraban no poder reproducir sus resultados. En todo caso, durante un tiempo F&P parecían haber logrado un doble propósito: fama internacional y una posible gran fortuna.

A dos años de distancia, el consenso mundial sobre F&P es negativo. Estos dos investigadores consiguieron una malísima fama internacional que seguramente les pesará en el resto de su carrera académica, si es que deciden continuar en ella. Por su anuncio espectacular, en vez de unos cuantos árbitros, miles de investigadores en todo el mundo detuvieron sus labores. Se desarrolló un fenómeno de psicosis colectiva. Algunos investigadores observaban e interpretaban sus resultados suponiendo que F&P estaban en lo cierto. Ser el primero en confirmar un fenómeno tan importante es, qué duda cabe, de gran transcendencia en la carrera de un investigador. Por otro lado, dar a conocer resultados negativos resultaba difícil, pues, debido al gran entusiasmo que había en todas partes, ¿quién habría de prestarle atención a un baño de agua fría?

Los resultados científicos, espectaculares o no, siempre están sujetos a un juicio que toma cierto tiempo. Utilizar los mecanismos de la comunidad científica presenta los riesgos de un juicio a puertas cerradas. Es decir, las arbitrariedades, cuando las hay, permanecen anónimas y, posiblemente, impunes. Sin embargo, la lección que esta aventura de la fusión fría nos deja es que en los juicios científicos abiertos la intervención de los medios de comunicación puede tener consecuencias muy negativas. Vale la pena recordar el sabio precepto de José Alfredo Jiménez, el conocido autor de música popular mexicana: lo importante no es llegar primero,... sino saber llegar.



COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de agosto de 1995 en Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. de C. V. (IEPSA), Calz. de San Lorenzo, 244; 09830 México, D.F. Se tiraron 2 000 ejemplares.

La Ciencia desde México es coordinada editorialmente por MARCO ANTONIO PULIDO Y MARÍA DEL CARMEN FARÍAS.



CONTRAPORTADA

Como hemos visto ya en anteriores libros de *La gran ilusión* se han dado casos en la historia de la física, y de otras ramas de la ciencia reciente, de que se prediga la existencia de un objeto y que, al tratar de encontrarlo, se haga elusivo y desafíe los esfuerzos de los científicos. Ejemplo notable es el del neutrino, partícula neutra y casi sin masa que debe acompañar a la desintegración beta para salvar un postulado fundamental de la ciencia: la conservación de la energía. Pauli lo propuso en 1931 y, hasta su descubrimiento por Reines, pasaron más de 25 años.

El presente libro, cuarto de *La gran ilusión*, trata sobre un acontecimiento científico que llegó a la sección de noticias de casi todo el mundo el jueves santo, 23 de marzo, de 1989. Se anunciaba, nada menos, que se había encontrado un método para producir la fusión nuclear a la temperatura ambiente. Los químicos Martin Fleischmann y Stanley Pons, en conferencia de prensa, dieron a conocer a los periodistas cómo producían la fusión fría en un simple frasco de vidrio. Una de las grandes ilusiones del mundo científico actual es controlar la fusión nuclear y convertirla en un proceso para generar energía, así el anuncio de los científicos norteamericanos produjo interés inusitado, pues el mismo fenómeno que produce la energía en el Sol se reproducía en la Tierra sin necesidad de la enorme densidad y altísima temperatura de una estrella.

Los autores de la *fusión fría* hacen la crónica de este experimento y, de paso, para entenderlo a fondo, hacen una reseña de lo que ha sido la investigación en el campo nuclear a partir del siglo XIX; de las teorías físicas que acompañaron su desarrollo, cómo se logró la fusión nuclear caliente, hasta llegar al surgimiento de una nueva gran ilusión: la fusión fría que, pese a su supuesta realización, continúa siendo aún buscada.

El doctor Jorge Flores Valdés ha publicado tres volúmenes de La Ciencia desde México con el título general de "La gran ilusión". En la actualidad se desempeña como director del Centro de Comunicación de la Ciencia. Al doctor Arturo Menchaca se debe *El discreto encanto de las partículas elementales* de esta colección. Obtuvo su licenciatura en la UNAM, su doctorado en la Universidad de Oxford y el posdoctorado en la Universidad de California en Berkeley. Actualmente es investigador nacional.

Inicio

