

EL “CLUB DEL URANIO” DE HITLER Y EL PROGRAMA ATÓMICO ALEMÁN EN LA SEGUNDA GUERRA MUNDIAL

F. J. YNDURÁIN MUÑOZ *

* Departamento de Física Teórica, C-XI, Universidad Autónoma de Madrid, Canto Blanco, E-28049, Madrid.
E-mail: fgy@delta.ft.uam.es.

1. EL DESCUBRIMIENTO DE LA ENERGÍA ATÓMICA. EL PROGRAMA ATÓMICO ALEMÁN

En los años veinte y primeros treinta la ciencia alemana, en la que incluyó aquí la austriaca o la realizada por científicos no alemanes en Alemania (como el holandés Debye o los húngaros Wigner y von Neumann), dominaba la física y la radioquímica mundiales. Tan solo unos pocos nombres fuera de este ámbito (Lawrence, Compton y Wheeler en los EE UU, Bohr en Dinamarca, Dirac en Inglaterra o Fermi en Italia) podían compararse con la pléyade de figuras germanas. Sin embargo, los científicos alemanes —el llamado “uranverein, o Club del Uranio— perdieron de manera clamorosa la carrera hacia el control de la energía atómica durante la Segunda Guerra Mundial: ni siquiera consiguieron hacer funcionar un reactor nuclear. En el presente artículo se analizarán, entre otras cosas, la historia y las razones de dicho fracaso.

1.1. De Fermi a Harteck y Heisenberg

En el proceso de resolución del rompecabezas de la fisión nuclear dos piezas clave fueron el italiano Fermi y los radioquímicos alemanes: Otto Hahn, Fritz Strassman y Lisa Meitner, además del teórico Otto Frisch. Los últimos (de hecho austriacos) fueron los que explicaron el fenómeno. Resulta irónico que varios de ellos, ciudadanos de países del eje, fueran obligados a exiliarse por el fanatismo antijudío de Hitler. Meitner y Frisch, judíos, realizaron su des-

cubrimiento en Suecia, donde habían tenido que exiliarse; y Fermi, cuya esposa era de origen judío, también se exilió, en 1938, al quedar claro que la alianza de Hitler con Mussolini les ponía en inminente peligro.

Fermi fue quien primero se dio cuenta de la importancia de utilizar neutrones de poca energía (conocidos como neutrones térmicos) para penetrar en el interior de los núcleos, a partir de 1934, y quien realizase sistemáticamente la irradiación de todos los elementos de la tabla periódica.

No es casualidad que fuese Fermi quien llevara a cabo este descubrimiento de la utilidad de los neutrones térmicos, y quien primero comprendió su significado: porque lo cierto es que, si a Fermi no se le ocurría una teoría para progresar en el conocimiento de la naturaleza física, hacia los experimentos que le permitieran avanzar en este conocimiento; y si en el experimento le faltaba un aparato, lo fabricaba él mismo. Además, después de realizar el experimento, Fermi pasaba a un estudio teórico de los resultados encontrados, con lo que su capacidad para comprender rápidamente nuevos fenómenos era realmente extraordinaria. En los años treinta nadie era capaz de establecer un modelo teórico satisfactorio para las interacciones nucleares fuertes que, de hecho, sólo se resolvieron a partir del año 1973. Fermi se dedicó, por tanto, a su estudio experimental.

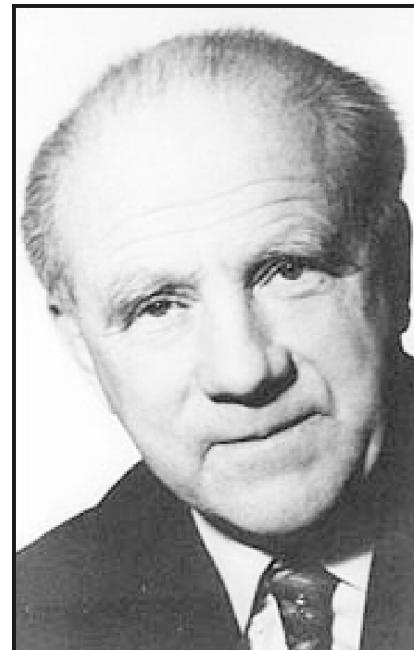
Como hemos dicho, el grupo de Roma se dedicó a irradiar con neutrones todos los elementos conocidos. Las medidas obtenidas con esto, y los cálculos teóricos

resultantes (Fermi desarrolló lo que se llama la regla de oro y la regla de platino para calcular secciones eficaces) fueron esenciales en el desarrollo posterior de los reactores nucleares. Aunque también es cierto que el propio Fermi no se dio cuenta de que los resultados del choque de los neutrones con los átomos de uranio consistían en que éste se rompía: tuvieron que ser los radioquímicos alemanes arriba citados los que analizaran los productos de la fisión, y Bohr (que lo había sabido de Lisa Meitner) quien se lo dijese a Fermi, entonces ya en EE UU, en 1939.

La importancia práctica de la fisión se debe a que se libera una enorme cantidad de energía; y, además, que se producen más neutrones de los que iniciaron la reacción. Los problemas son que solo un isótopo (variedad) del uranio, el conocido como U-235 produce suficientes neutrones para una reacción autosostenida; pero este isótopo se encuentra en ínfimas cantidades en la naturaleza. Un segundo y tercer problema para construir un reactor nuclear son cómo frenar los neutrones (dado que únicamente los lentes reaccionarán antes de abandonar el material), y cómo controlar el proceso.

Debido a que solo un isótopo de uranio produce suficientes neutrones, era pues deseable enriquecer la mezcla de uranio, aumentando la proporción de isótopo U-235 y avanzar en la investigación con una mezcla de empirismo experimental y cálculos teóricos. Estos eran extraordinariamente complejos. Digamos, como ejemplo, que aunque un primer modelo teórico de la fisión (conocido como modelo de la gota líquida) fue ya propuesto por Niels Bohr y el americano John Wheeler en 1939, lo cierto es que la primera explosión de una bomba atómica en Nevada, el 16 de julio de 1945, demostró que los cálculos teóricos de su potencia estaban equivocados en un factor del orden de diez. Sin la experiencia conseguida con el manejo previo de reactores los errores hubieran sido mucho mayores y habrían, tal vez, hecho imposible el construir un ingenio explosivo.

En diciembre de 1942 Fermi consiguió, en los sótanos de la Universidad de Chicago, llevar a cabo una reacción nuclear sostenida en una pila de capas de uranio, en forma de ovoides inmersos en el moderador, el grafito (que frenaba a los neutrones), controlando el proceso por barras de cadmio que absorbían neutrones



Werner Heisenberg, en los años inmediatamente después del fin de la Segunda Guerra Mundial.

y, por lo tanto permitían el manejo de la reacción, en un delicado equilibrio. Tan delicado que, aunque un segundo reactor, construido en Argonne (aprovechando también los consejos e indicaciones de Fermi) funcionó de forma aceptable, un tercero, que se puso en marcha en Hanford (Estado de Washington) en septiembre de 1944, se apagó casi inmediatamente después y llevó bastantes meses descubrir el fallo y repararlo. Hay pocas dudas de que la pericia de Fermi ahorró a los americanos años de difícil experimentación, y más de un fracaso.

Frente a la capacidad tanto teórica como experimental de Fermi, y el soberbio plantel de científicos reunidos en el proyecto americano, el grupo alemán era muy inferior. Heisenberg, teórico de principio a fin, tuvo serios problemas incluso a la hora de obtener el título de Doctor. Esto incluía, en Alemania, un examen de física del candidato: examen en el que Heisenberg mostró un desconocimiento total de todo lo que no fuese la más pura teoría. Wien, que estaba en el tribunal, era partidario de suspenderle, pero, aparentemente, Sommerfeld le convenció del error que sería no pasar a una persona tan brillante. Finalmente llegaron a un compromiso y Heisenberg recibió su doctorado, pero con la calificación más baja posible.

Es muy probable que este desinterés de Heisenberg por la experimentación fuera una de las causas del fracaso del programa alemán de fisión nuclear, encomendado al grupo dirigido por él el cual, intentando bajo su recomendación utilizar agua pesada, muy escasa y difícil de producir (en lugar de grafito, como el grupo de Fermi), y con un importante desconocimiento de secciones eficaces y ritmos de producción de neutrones, no pasó de construir prototipos de laboratorio, ninguno de los cuales funcionó. El fracaso, de hecho, fue múltiple. El abandono del grafito se debió a que unas medidas realizadas por W. Bothe (que dirigió el equipo experimental alemán), equivocadas probablemente por contener el grafito excesivas impurezas, sobreestimaron la absorción de neutrones. Nadie fue capaz en Alemania de corregir estas medidas.¹

En segundo lugar, un reactor de agua pesada es posible, como demostraron los canadienses en 1945; pero los prototipos alemanes utilizaban una geometría inapropiada, y sus prototipos nunca llegaron a funcionar. Por otra parte, los alemanes fueron incapaces de darse cuenta de la importancia de utilizar aceleradores de partículas para estudios de física nuclear y desaprovecharon los dos (uno en Dinamarca y otro, incompleto y nunca completado, en París) a los que tenían acceso.

Esta incompetencia nazi era aún más marcada por el hecho de que, según las estimaciones de los expertos, al comienzo de la guerra, en el año 1939, los alemanes llevaban dos años de adelanto sobre los programas briánico o francés, en aquella época los más avanzados de los de los países aliados. En efecto, un reactor casi crítico fue construido por Paul Harteck en la Universidad de Hamburgo en la primavera de 1940, casi dos años antes que Fermi; y el propio Harteck y su colega Groth habían alertado a Eric Schumann, director de investigación de la oficina de armamento del ejército (Heereswaffenamt) acerca de la posibilidad de fabricar explosivos nucleares un año antes. El reactor de Harteck utilizaba carbono como moderador, en la forma de CO_2 sólido (lo que se conoce popularmente como hielo seco), mucho más fácil de refinar que el

grafito y, probablemente, fracasó en hacerlo crítico por no contar a la vez con suficiente uranio y una cantidad adecuada de "hielo seco." Harteck tuvo que abandonar sus experimentos e integrarse en el grupo de Heisenberg, conocido como el Uranverein ("club del uranio") en el que jugó un papel muy secundario.

Una idea gráfica de la incapacidad técnica del grupo alemán del Uranverein la da la reacción de Gerlach cuando se enteró de que los americanos habían hecho estallar las bombas atómicas sobre Hiroshima y Nagasaki. Dirigiéndose al grupo (que incluía a Heisenberg) de científicos atómicos alemanes recluidos con él en la granja de Farm Hill, donde los aliados les llevaron al final de la guerra en Alemania, les espetó:² "¡Si esto es cierto, ustedes son unos incompetentes!". Efectivamente, lo eran; excepto el propio Gerlach, y Heisenberg, uno de los teóricos más brillantes del siglo, pero (como ya se ha comentado) con serias carencias como experimentador. Hahn, un radioquímico excelente (pero que rehusó participar en el programa alemán), y al que los aliados también recluyeron en Farm Hill, abundó en la opinión de Gerlach.

1.2. La cuestión económica

Queda la pregunta de si los germanos hubiesen podido construir una bomba atómica si no hubiesen espantado a sus mejores científicos. La respuesta es, un reactor nuclear seguramente sí, pero, en las circunstancias que se dieron en Alemania a partir de 1941, una bomba muy probablemente no; aunque tal vez sí hubieran podido si se hubiesen tomado la cuestión en serio en 1940; por ejemplo, si el reactor de Harteck hubiese funcionado. Y ello debido a la cuestión económica.

En un principio, la política de Hitler pareció resolver los problemas económicos de la República de Weimar, pero esta solución (basada en promover el empleo por medio de la industria armamentística) llevaba a medio plazo a la ruina. Una causa no trivial de

¹ Agradezco a Manuel Fernández-Rañada el recordarme que, en el campo aliado, la persona que se percató de la importancia de eliminar las impurezas del grafito fue el húngaro-americano Leo Szilard.

² Según el libro de Volpi, En busca de Klingsor, aunque yo no he podido encontrar corroboración independiente de ello. Sí la hay de un comentario similar de Hahn (con quien tal vez se confunde Volpi), por ejemplo en el libro de Bernstein citado en la bibliografía.

la insensata carrera hacia la guerra del III Reich es que ésta permitía al gobierno de Hitler no pagar sus deudas. Pero la situación económica no se arregla con milagros y, durante toda la guerra, la financiación de cualquier actividad que no fuese directamente rentable para el esfuerzo bélico era, simplemente, imposible en Alemania.

Son estos, la disponibilidad de científicos de primera línea, y la capacidad económica e industrial, los dos pilares sobre los que basar cualquier esfuerzo que involucre de forma decisiva a la tecnología: desde la fabricación de una bomba atómica a la implementación de Internet. Pero, con respecto al desarrollo de la energía atómica, no bastan científicos cualesquiera; la aparente sencillez del proceso final de producción de esta energía, violenta o no, oculta la enorme dificultad que supuso descubrirlo.

Después del fin de la guerra, dos misiones americanas se desplazaron a Alemania y a Japón con el fin de, entre otras cosas, estudiar la situación económica de estos países antes, durante y después de la guerra. El conocido economista John K. Galbraith fue parte de ambas, y cuenta algunos resultados en su autobiografía (*A life in our times*, Houghton, 1981). La economía alemana, según estos estudios, superaba a la británica en un 30%, aunque estaba muy mal gestionada. El esfuerzo de guerra era tal que no quedaban recursos, en ninguno de estos dos países, para dedicarlos a una incierta investigación nuclear: Gran Bretaña la abandonó completamente en 1943, al darse cuenta de lo costoso del esfuerzo y lo aleatorio de sus resultados, yéndose sus científicos a engrosar el contingente americano y canadiense.

Los proyectos alemanes nunca tuvieron una financiación suficiente, ni de lejos. Únicamente los Estados Unidos, con un producto bruto que casi duplicaba al alemán (y diez veces superior al japonés) pudo permitirse el lujo de mantener una guerra con las dos, Alemania y Japón, y, además, en plena guerra, en 1944, gastar los 1 000 000 000 dólares que el proyecto Manhattan (nombre en clave del programa nuclear americano) consumía al año en una empresa cuya factibilidad no estaba garantizada.

En efecto, debido a que no estaba claro cuál procedimiento iba a funcionar (ni si iba a hacerlo alguno)

los americanos intentaron, de forma simultánea, varios métodos distintos para fabricar un explosivo nuclear, de los que dos funcionaron. Uno de ellos utilizaba plutonio, un elemento creado artificialmente a partir de uranio, y descubierto en Berkeley, California, por el grupo de Lawrence; el otro utilizaba el isótopo U-235. Para la producción de plutonio, Lawrence y su gente se lanzaron a la construcción simultánea de sincrotones, conocidos como "caultrones". Estos no consiguieron producir una cantidad suficiente de plutonio (ni tampoco separar efectivamente uranio-235, otra de las tareas a las que fueron dedicados) para ser utilizado en una bomba, pero sí para estudiar sus propiedades químicas: algo que es esencial a la hora de separar el plutonio producido en reactores nucleares, uno de los métodos que sí funcionaron.

Para utilizar el U-235 primero había que separarlo del isótopo U-238, un proceso enormemente costoso, difícil y peligroso. La solución de este problema fue, probablemente, el logro industrial más caro e importante del proyecto. De hecho, de los dos métodos intentados para separar el U-235, uno, el ya citado de hacerlo por medio de aceleradores de partículas, haciéndolos trabajar como espectrómetros de masas, no funcionó y únicamente los procedimientos de difusión de un compuesto de uranio (hexafluoruro) produjo, lenta y difícilmente, cantidades apreciables. Tan lenta y difícilmente que, de las primeras tres bombas, la del primer test y la de Nagasaki utilizaron plutonio, y sólo la de Hiroshima empleó uranio.

La obtención del plutonio (más bien habría que decir la creación; el plutonio no existe en la naturaleza) tampoco era sencilla. Se creaba por bombardeo del U-238 por neutrones en una pila atómica. El separarlo del resto del uranio no era trivial y, como ya se ha dicho, no se hubiese podido conseguir con la rapidez con la que se hizo sin los estudios previos realizados sobre las propiedades del nuevo material, gracias su producción por los científicos del grupo de Lawrence.

De este breve repaso a los trabajos requeridos por la fabricación de la bomba americana resulta evidente que Alemania no hubiera podido, a partir de 1942 (cuando el esfuerzo bélico, sobre todo en Rusia, empezó a exigir todos los recursos económicos) fabricar una bomba, aun si hubiesen logrado hacer funcionar un reactor. Pero la pregunta que tiene más difi-

cil respuesta es la siguiente: si un hipotético equipo científico del eje, más equilibrado y apoyado que el Uranverein, hubiese hecho funcionar un reactor en Alemania en 1940 (algo de lo que, como hemos contado, estuvo muy cerca el propio Harteck en la primavera de ese año); y si una persona competente, como Speer, hubiese estado entonces a cargo de la economía nazi, ¿hubiese sido posible para los alemanes construir una bomba atómica? En particular, ¿qué habría ocurrido si Alemania hubiese desde el principio concentrado sus esfuerzos, hubiera escogido correctamente a los líderes (Heisenberg fue más una rémora que una ayudante) y no hubiese tolerado que las industrias alemanas se dedicasen a enriquecerse a costa del esfuerzo de guerra? Por supuesto, es imposible una respuesta a tal pregunta; pero mi opinión personal es que, en estas circunstancias, sí. Los esfuerzos que se realizaron para (por ejemplo) las V-1 y V-2, y el desarrollo de cazas a reacción, transferidos al programa nuclear, hubieran muy probablemente llevado a una bomba atómica alemana tal vez en 1943 o 1944. Es indudable que una de las causas de la derrota del II Reich fue su nefasta política científica.

1.3. Otros programas nucleares

Digamos, como comentario final respecto a esta breve historia de la energía nuclear durante la II Guerra Mundial, que la Unión Soviética consiguió resolver el problema de la utilización bélica de esta energía en 1948, lanzando su primera bomba en 1949: indudablemente, el saber que esta utilización era posible, y conocer los métodos empleados por los americanos (en parte por filtraciones de simpatizantes comunistas), ayudó enormemente al programa nuclear soviético que, por otra parte, dedicó a ello enormes energías.

Francia (uno de cuyos científicos, Frédéric Joliot, fue quien primero midió flujos de neutrones y consideró la posibilidad de producir reacciones en cadena) y Gran Bretaña hubieran, probablemente, podido llegar a construir ingenios autóctonos en, aproximadamente, las mismas fechas, si hubieran dedicado a tal fin el mismo esfuerzo que los rusos; al no hacerlo, retrasaron bastante su incorporación al club. En particular Francia, país que decidió, hasta la ascención de de Gaulle al poder, renunciar al uso militar de la energía

atómica. Sin embargo, tanto Francia como Gran Bretaña construyeron reactores nucleares experimentales ya en 1948 y Canadá, bien es verdad que con ayuda de científicos franceses y británicos, se les adelantó poniendo en marcha un reactor, que utilizaba agua pesada como moderador, en 1945. Desde luego, el esfuerzo guerrero de Canadá no resultó excesivamente pesado para su economía, lo que les permitió dedicar recursos a la energía nuclear; y su capacidad de atracción, como país alejado del teatro de operaciones bélicas, le ayudó a contar con profesionales competentes.

El ejemplo de Canadá pone de nuevo de manifiesto la falta de altura de los científicos que se alinearon con el III Reich. Es cierto que Alemania, como se ha dicho, no hubiese podido fabricar una bomba atómica, para lo que le faltaban los recursos económicos que requería la producción de plutonio o la separación del U-235; pero, si el grupo germano hubiese sido de mayor altura científica, en especial en la vertiente experimental y fenomenológica, podrían, muy probablemente, haber conseguido que funcionase un reactor de agua pesada en fechas parecidas a aquellas en las que lo lograron los canadienses. Pero los Bethe, Meitner, Frisch y tantos otros que hubieran podido hacerlo se habían marchado, y los Hahn, von Laue o Planck rehusaron participar en el esfuerzo nazi. Bothe, que sí participó, no tenía ni de lejos el nivel de Fermi. Harteck y von Ardenne, los más competentes desde el punto de vista técnico de los germanos, sólo jugaron un papel secundario.

2. MÁS SOBRE HEISENBERG Y FERMI

Y para terminar, digamos unas palabras más acerca de Heisenberg y Fermi, desde el punto de vista científico, más allá de su papel en el programa atómico.

2.1. Heisenberg

El brillo de Heisenberg como teórico no es inferior al de ningún otro físico de nuestro siglo, con la posible excepción de Einstein. En 1925, durante unas vacaciones en Helgoland (huyendo de una fuerte alergia), tuvo lo que él califica de relámpago de intuición y formuló, esencialmente, los fundamentos de la mecánica cuántica al postular que, a diferencia de las cantidades

clásicas, que pueden multiplicarse en cualquier orden, el producto de dos variables cuánticas depende del orden en el que se realice.

Teniendo esto en cuenta, Heisenberg desarrolló una nueva mecánica, conocida como mecánica matricial, que reproducía las reglas cuánticas postuladas empíricamente por Bohr y otros. Dos años después Heisenberg mostró que su mecánica implicaba el principio conocido como principio de incertidumbre, o de indeterminación, según el cual cantidades tales como posición o velocidad no tienen, a escala microscópica, valores bien definidos: comenzando con ello una revolución cuyos fundamentos aun hoy no son completamente comprendidos y cuyas aplicaciones son innumerables.

Aparte de estos trabajos fundamentales, Heisenberg realizó una de las primeras aplicaciones de la mecánica cuántica, al resolver el átomo de helio; fue quien primero reconoció la importancia de la matriz-S (introducida por Wheeler poco antes) en colisiones cuánticas; y, con Pauli, introdujo el método Lagrangiano en mecánica cuántica relativista. Además de esto, Heisenberg imaginó uno de los conceptos básicos de la física de partículas, el de simetría interna, con su teoría de lo que hoy llamamos isospín, y desarrolló la teoría del ferromagnetismo. Y la actividad de Heisenberg no se limitó al campo de la física; su contribución al renacer de la ciencia europea después de la guerra no fue despreciable. Por ejemplo, fue uno de los promotores del Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN) cuyo Comité de Política Científica presidió.

Heisenberg siguió también intentando trabajar en física después de acabada la guerra, pero nunca se sobrepuso a su fracaso personal, el colaborar con el III Reich, ni al profesional, en su faceta como experimentador, en el fiasco del programa nuclear Nazi. Aunque formó algún sucesor (varios de los más competentes teóricos alemanes de la posguerra tuvieron contacto con él) su herencia no puede ni de lejos compararse con la dejada por Fermi en los Estados Unidos.

Tampoco resultaron relevantes sus contribuciones teóricas; Heisenberg se empeñó en buscar una teoría unificada de la dinámica de las partículas elementales sobre bases muy poco sólidas, y en fundamentar la teoría de los campos cuánticos relativistas identificando la renormalización con la cuestión de la existencia

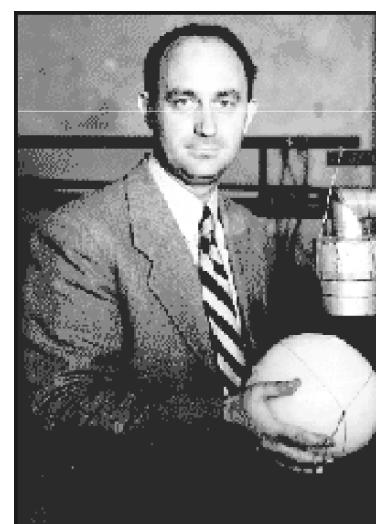
de una métrica indefinida en el espacio de los estados, algo también muy alejado de la realidad.

Personalmente, tuve un mínimo contacto con él, en un seminario suyo al que asistí en el CERN, en los años 60, y en la lectura de un folleto que editó sobre un tema que entonces me interesaba a mí (un modelo de interacción formulado por T. D. Lee), su *Einführung in die Theorie des Elementarteilchen*, 1961, que me proporcionó uno de sus discípulos de entonces. Siento decir que ambos, seminario y libro, me decepcionaron.

2.2. Fermi y la física básica

Finalmente, diremos unas palabras sobre Enrico Fermi. La faceta de científico básico de Fermi, aunque menos espectacular de cara al gran público, no desmerece en absoluto de sus logros como experimentador y físico aplicado: muy al contrario. Las contribuciones de Fermi a los fundamentos de la mecánica cuántica son esenciales. A la vez que Dirac descubrió (1926-1927) que cierto tipo de partículas (como los electrones o protones) tienen unas propiedades estadísticas radicalmente distintas de las que tendrían si fueren objetos clásicos.

En particular, de estas propiedades estadísticas se sigue el conocido como principio de exclusión, formulado poco antes por Pauli, que especifica que dos partículas de este tipo no pueden estar en el mismo



Enrico Fermi.

estado (por ejemplo, dos protones no pueden ocupar el mismo lugar), lo que explica la incompresibilidad de la materia. Otra consecuencia de estas propiedades estadísticas descubiertas por Fermi es que en la materia condensada los electrones tienen una energía que, si no están excitados, llena todos los niveles energéticos hasta un cierto nivel (conocido como nivel de Fermi). Esta propiedad es esencial para entender fenómenos tales como la conductividad eléctrica.

Una vez establecida la mecánica cuántica, lo que podemos considerar realizado después de los trabajos de Schrödinger, Dirac y Heisenberg, y del propio Fermi, digamos en 1927, resultaba esencial intentar formular esta mecánica de forma compatible con la otra gran revolución del siglo, la teoría de la relatividad. En particular, un problema básico lo constituía el presentar una formulación a la vez relativista y cuántica del campo electromagnético. Fue Heisenberg quien hizo uno de los primeros intentos en la dirección correcta, y Fermi quien primero la llevó a cabo. Y, aunque menos importante que lo mencionado, no es ni mucho menos despreciable la contribución de Fermi (coetánea de las de Breit y Bethe) acerca de las correcciones relativistas a los niveles atómicos, en particular su explicación de la estructura hiperfina.

La última contribución de Fermi que discutiremos en detalle se refiere a la formulación de la teoría de las interacciones débiles, que son las responsables de muchas desintegraciones radiactivas (en particular, de la desintegración beta). La primera evidencia de la existencia de una interacción mucho más débil que la conocida interacción electromagnética fue en efecto la desintegración conocida como “desintegración beta” de ciertas substancias, descubierta por Becquerel y los Curie a finales del siglo XIX. En esta desintegración se producen directamente electrones (rayos beta) y unas partículas neutras, postuladas por Pauli en 1930 y a las que Fermi dio el nombre italiano de neutrinos, que quiere decir “pequeños neutrones”. Subsidiariamente, se emiten también rayos alfa y rayos gamma. Fue precisamente Fermi el primero en proponer una teoría del

proceso, en 1932. En lenguaje moderno diríamos que un quark de tipo d en el interior de uno de los neutrones del núcleo que se desintegra se convierte en un quark de tipo u, emitiendo un electrón y un neutrino.

En la teoría de Fermi la interacción (que por ser mucho menos intensa que la familiar electromagnética se conoce como interacción débil) sólo tenía lugar si las cuatro partículas, d, u, e y neutrino, se encontraban en el mismo punto. En esto se diferenciaba de la interacción electromagnética, mediada por el intercambio de fotones a distancias finitas. La teoría de Fermi subsistió durante bastante tiempo: únicamente en los años setenta y ochenta, al realizarse experimentos a grandes energías (docenas e incluso cientos de miles de millones de electrón-voltios) tuvo que sustituirse por la de Glashow-Weinberg-Salam, más precisa, en que la interacción se realiza intercambiando partículas (W y Z). Pero su idea, pionera, de considerar que los procesos elementales consisten en creación y aniquilación de partículas ha quedado como uno de los fundamentos de la física del microcosmos.

Después de la guerra, Fermi volvió a la física fundamental y, aunque ya no hizo contribuciones comparables con las anteriores, si realizó trabajos importantes. Fermi fue uno de los primeros en utilizar aceleradores para estudiar colisiones entre piones y protones, detectando una resonancia (conocida como Δ_{33}) con lo cual encontró la primera evidencia de que, en contra de lo que se creía hasta la fecha, estas partículas (piones y protones) no son elementales.

BIBLIOGRAFÍA

1. J. Bernstein, *Hitler's Uranium Club*, editado en 1996 por el American Institute of Physics.
2. Jorge Volpi, *En busca de Klingsor*, Seix Barral, 1999.
3. F. J. Ynduráin, *Los desafíos de la ciencia*, Ed. Crítica, 2005.