

José Manuel Sánchez Ron

María Goeppert Mayer: de Gotinga a Premio Nobel de Física

María Goeppert Mayer (1906-1972) fue una de las cuatro mujeres que, hasta la fecha, han obtenido el Premio Nobel de Física: Marie Curie (1903), María Goeppert Mayer (1963), Donna Strickland (2018) y Andrea Ghez (2020). Insertando su biografía y contribuciones en el contexto de los mundos científico y nacional en los que vivió (Alemania y Estados Unidos), el catedrático emérito de Historia de la Ciencia en la Universidad Autónoma de Madrid y miembro de la Real Academia Española, José Manuel Sánchez Ron, reconstruye en este libro los avatares de su carrera, que la llevó de la Universidad de Gotinga a la de California en San Diego, pasando por Johns Hopkins, Columbia y Chicago. Dotada especialmente para la física teórica, sin embargo las “circunstancias” de su vida no le permitieron desarrollar un programa de investigación con cierta coherencia y continuidad. La principal “circunstancia” de su vida profesional fue su matrimonio con un científico, Joseph Mayer, algo de lo que se valieron la mayoría de las instituciones en las que éste trabajaba para negarle puestos y salarios. En consecuencia, tuvo que adecuarse a los intereses científicos de las personas que investigaban en los centros en los que su esposo profesaba. Científicos – como Karl Herzfeld, Edward Teller o Enrico Fermi – que reconocieron su talento, como antes lo habían reconocido Max Born y James Franck en Gotinga. Y en todas las ocasiones, en todas las instituciones en que estuvo dejó huella. Así hasta llegar a su gran éxito, el modelo nuclear de capas, que la condujo al Premio Nobel.

José Manuel Sánchez Ron se licenció en Física en la Universidad Complutense de Madrid y doctoró en la Universidad de Londres. Desde 2019 es catedrático emérito de Historia de la Ciencia en la Universidad Autónoma de Madrid, donde antes de obtener esa cátedra en 1994 fue profesor titular de Física Teórica. Es autor de numerosas e influyentes obras de historia de la ciencia internacional y española. En 2015 recibió el Premio Nacional de Ensayo por *El mundo después de la revolución. La física de la segunda mitad del siglo XX*, el primer Premio Nacional concedido a un libro dedicado a la historia de la ciencia. En 2016 recibió el Premio Julián Marías a la carrera científica en Humanidades de la Comunidad de Madrid. Desde 2003 es miembro de la Real Academia Española.

Esta obra es conmemorativa del 40 aniversario del Consejo de Seguridad Nuclear. Nuestro organismo cumple 40 años al servicio de la seguridad nuclear y de la protección radiológica en España. Su misión sigue siendo proteger a los trabajadores, la población y el medio ambiente de los efectos nocivos de las radiaciones ionizantes, consiguiendo que las instalaciones nucleares y radiactivas sean operadas por sus titulares de forma segura y con medidas de prevención.

José Manuel Sánchez Ron **María Goeppert Mayer: de Gotinga a Premio Nobel de Física**

José Manuel Sánchez Ron

María Goeppert Mayer: de Gotinga a Premio Nobel de Física



José Manuel Sánchez Ron

**María Goeppert Mayer:
de Gotinga a Premio Nobel de Física**

José Manuel Sánchez Ron

**María Goeppert Mayer:
de Gotinga a Premio Nobel de Física**

*A todas las mujeres que desearon ser científicas,
pero no pudieron.*

“Pasamos una sola vez por este mundo.
Pocas tragedias pueden ser más vastas que
la atrofia de la vida; pocas injusticias más
profundas que la de negar una oportunidad
de competir, o incluso esperar, mediante
la imposición de un límite externo, que
se intenta hacer pasar por interno”.

STEPHEN JAY GOULD,
The Mismeasure of Man (1981)

© Consejo de Seguridad Nuclear, 2020
© José Manuel Sánchez Ron

Edición:
Consejo de Seguridad Nuclear
C/ Pedro Justo Dorado Dellmans, 11
28040 Madrid

www.csn.es

Diseño y maquetación: Tau Diseño
Impresión: Punto Verde

Depósito Legal: M-28007-2020

Sumario

INTRODUCCIÓN	11
PRÓLOGO	15
CAPÍTULO 1	
El mundo científico de María Goeppert Mayer: la mecánica cuántica	19
CAPÍTULO 2	
Gotinga y los primeros años de María Goeppert	61
CAPÍTULO 3	
Estados Unidos	113
CAPÍTULO 4	
María Goeppert Mayer en Estados Unidos (1930-1945)	147
CAPÍTULO 5	
El camino hacia el Nobel	195
BIBLIOGRAFÍA	247



Introducción

En este 2020 que será recordado por todos por la fatídica pandemia de la covid-19, el Consejo de Seguridad Nuclear que me honro en presidir alcanza los cuarenta años de existencia. Si bien es cierto que su origen se remonta a la Junta de Energía Nuclear – creada en 1951 al calor de similares organismos establecidos en otros países europeos tras la Segunda Guerra Mundial –, de la que dependía todo lo relativo a la energía nuclear, no es hasta 1980 cuando se publica en el Boletín Oficial del Estado la Ley de Creación del Consejo, una institución independiente de la Administración General del Estado que tiene como fin primordial velar por la seguridad nuclear y la protección radiológica de las personas y del medio ambiente.

Aunque entre sus funciones principales se encuentran las reguladoras de las instalaciones nucleares y radiactivas, o la vigilancia del medio ambiente, tiene otros objetivos menos conocidos como son el desarrollo y promoción de planes de investigación. Y es que esta institución no sólo es deudora de la herencia de experiencia y conocimiento acumulado en estos ocho lustros de existencia, sino que tiene muy presente continuar con el compromiso de profundizar en la investigación y continuo aprendizaje con los que contribuir a la buena marcha de nuestro organismo en el futuro.

Bajo esta premisa, y como conmemoración de nuestro 40 aniversario, hemos querido publicar esta obra que, además, sirva para recordar y reivindicar a María Goeppert Mayer, uno de los científicos más importantes en el desarrollo de la física nuclear. Una mujer y científica que amó, vivió y trabajó por la ciencia. Para este fin, hemos contado con la inestimable colaboración de quien firma este libro, José Manuel Sánchez Ron (físico, catedrático de Historia de la Ciencia y académico de la Real Academia Española y correspondiente de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, entre otros logros de su extenso currículo), quien reconstruye su vida y obra con excepcional escritura.

Son muchos los científicos que podíamos haber escogido relacionados con los ámbitos de lo nuclear o radiológico, pero hemos querido rendir homenaje a una mujer extraordinaria que, a pesar de vivir la ciencia desde pequeña y disponer de un fenomenal talento para la física y las matemáticas, por el hecho de ser mujer, no pudo desarrollar una carrera científica con normalidad.

Aunque se doctoró en física en 1930, con apenas 24 años y en una época en la que era extraño que las mujeres accediesen a la universidad, no encontraba un trabajo digno como científica. Las instituciones le hacían de menos y no hallaba un trabajo como científica digno a su mente privilegiada. A pesar de esto, ella no se rendía y, mientras recorría Estados Unidos, acompañando a su marido, colaboraba con las mayores mentes de la física cuántica, pero sin obtener un puesto académico. Su intelecto le había abierto paso a la fuerza entre sus iguales y se había convertido en un referente mundial. Sin embargo, no sería hasta 1946 cuando comenzaría realmente su vida profesional, cuando recibió un nombramiento en un departamento de física en Chicago.

Otro de los aspectos de su biografía que me gustaría destacar es su ánimo de colaboración e intercambio de conocimiento, entendiendo que la ciencia es algo que afecta a toda la humanidad. Siempre que podía se abría a nuevos estudios y colaboraciones que la permitiesen profundizar en diferentes campos o poco investigados por ella. Así estableció vínculos con los principales científicos de su época, convirtiéndose en amistad personal en muchos casos.

María Goeppert Mayer había logrado convertirse en una física de prestigio, pero eso no quiere decir que tuviera el reconocimiento que se merecía. No sería hasta 1960, cuando tenía 54 años, cuando se le ofreció un puesto a jornada completa como catedrática de Física de la Universidad de California. Era el primer trabajo reconocido y bien remunerado que conseguía.

Tres años después, en 1963, recibiría junto a Hans Jensen (y Eugene Paul Wigner) el Premio Nobel de Física “por sus descubrimientos relacionados con la estructura nuclear de capas”. Se convertía así en la segunda mujer en obtener un Premio Nobel en ciencia después de que Marie Curie recibiese los de Física (1903) y Química (1911). Después de ella, tan solo otras dos mujeres lo han obtenido, también de manera compartida, la canadiense Donna Strickland (2018) y la estadounidense Andrea M. Ghez (2020), lo que hace que el Nobel de Física sea el Premio Nobel que menos mujeres hayan ganado.

Por fin María Goeppert Mayer no sólo era reconocida como una gran científica, sino que había conseguido hacer ciencia. Tras una larga carrera – buena parte de ella en la sombra –, siendo ejemplo de lucha, superación y dejando huella allí por donde pasaba, había derribado las barreras burocráticas gracias a su tesón y capacidad. Por eso, en esta publicación conmemorativa del 40 aniversario del Consejo de Seguridad Nuclear, queremos honrarla con el mayor de los reconocimientos, permanecer en nuestro recuerdo.

Pero también quisiera que este libro sirva para prestigiar la contribución de las mujeres a la ciencia a lo largo de la historia. Un papel que ha solido silenciarse, marginarse e invisibilizarse. La ciencia no entiende de género sino de investigación y conocimiento y éstos no distinguen entre hombres y mujeres. Por eso, deseamos que esta publicación ayude a normalizar y poner en valor el esfuerzo y capacidad que han tenido, tienen y tendrán en el complejo universo científico todas las investigadoras, estudiosas y científicas.

Josep María Serena i Sender
Presidente del Consejo de Seguridad Nuclear

Prólogo

La ciencia constituye uno de los grandes patrimonios de la humanidad. Contribuye de forma decisiva a liberarnos de mitos que pueden atenazar nuestras vidas. Su hermana, la tecnología, nos alivia de todo tipo de servidumbres físicas. Y qué decir de la mestiza y buena samaritana que es la medicina, una maravillosa combinación de ciencia, técnica y arte (el de la relación médico-enfermo) a la que prácticamente todos recurrimos en un momento u otro de nuestras vidas. Al ser la ciencia patrimonio de la humanidad cabría esperar que en la historia de las diferentes disciplinas científicas figurasen, en números aproximadamente comparables, tanto hombres como mujeres, pero no ha sido así. Hasta hace poco el número de científicos que han dejado huella profunda en la ciencia ha sido muy superior, tremendamente superior, al de científicas. (De lo que está sucediendo ahora es pronto para enjuiciar, aunque no hay duda de que la presencia de mujeres en la ciencia ha aumentado significativamente.) Precisamente por semejante desequilibrio – injusto si tenemos en cuenta que las capacidades intelectuales de ambos sexos no parecen diferir – es siempre oportuno recuperar la obra de científicas que sobresalieron en un mundo dominado por hombres. María Goeppert Mayer (1906-1972) fue una de las mujeres que dejaron huella en el mundo de la ciencia. Y lo hizo en una disciplina aparentemente hostil a ellas, la física, al menos si juzgamos por ese baremo que son los Premios Nobel. Hasta la fecha únicamente cuatro mujeres han obtenido el Premio Nobel de Física: Marie Curie (1903), María Goeppert Mayer (1963), Donna Strickland (2018) y Andrea Ghez (2020).

En este libro he intentado reconstruir la vida y obra de María Goeppert Mayer, insertando ambas en el contexto de los mundos científico y nacional en los que vivió (en Alemania y Estados Unidos). Cómo fueron esos mundos es algo que se verá en los capítulos que siguen, pero ahora deseo recalcar un aspecto de su biografía. Fue una persona particularmente dotada para la física teórica, disciplina en la que recibió una magnífica educación en la Universidad de Gotinga, uno de los

centros líderes de la física más avanzada del momento, la física cuántica. Sin embargo, cuando se analiza el conjunto de su carrera, se comprueba que las “circunstancias” de su vida no le permitieron desarrollar un programa de investigación con cierta coherencia y continuidad, como sí pudieron hacerlo otros jóvenes compañeros suyos de los años de Gotinga, entre otros, Weisskopf, Mulliken, Elsasser o Houtermans. La principal “circunstancia” de su vida profesional fue estar casada con un científico, Joseph Mayer – que la ayudó siempre –, lo que impidió, o más bien aprovecharon la mayoría de las instituciones en las que éste trabajaba para negarle a María puestos y salarios, escudándose en las leyes antinepotismo. Tuvo que ir a remolque, adecuarse a los intereses científicos de las personas que investigaban en los centros en los que su esposo profesaba. Científicos – como Karl Herzfeld, Edward Teller o Enrico Fermi – que reconocieron su talento, como antes lo habían reconocido en Gotinga Max Born y James Frank. Y en todas las ocasiones, en todas las instituciones en que estuvo – desde la Universidad Johns Hopkins a la de California en San Diego, pasando por las de Columbia y Chicago – brilló, dejó huella. Así hasta llegar a su gran éxito, el modelo nuclear de capas, que le valió el Premio Nobel.

He disfrutado y aprendido mucho escribiendo este libro, explorando los mundos habitados por María Goeppert Mayer, pero no fui yo quien propuso el tema sino el Consejo de Seguridad Nuclear. Mi agradecimiento por ello es grande. Y también por permitirme participar – constituye un honor y un placer – en la celebración del 40 aniversario de su creación.

Madrid, 22 de septiembre de 2020



El mundo científico de María Goeppert Mayer: la mecánica cuántica

Este libro trata de María Goeppert Mayer, pero antes de considerar su vida y contribuciones a la ciencia es conveniente ofrecer un panorama del mundo científico en el que se desarrollaron sus trabajos, y ese mundo no fue otro que el de la física cuántica, el conjunto de teorías cuyo primer pilar – el más fundamental aunque no sirviera para abarcar todos los “escenarios” del microcosmos – es la denominada mecánica cuántica. En este capítulo repasaré sucintamente algo de la historia de esa ciencia, que junto a las teorías especial y general de la relatividad revolucionaron la física, generando cambios que afectaron profundamente a la humanidad con algunas de sus aplicaciones.

Espectroscopía, astrofísica y radiación de un cuerpo negro

Suele ser habitual situar el origen de la física cuántica en la aportación que realizó Max Planck en 1900 al introducir los “cuantos de acción”; sin embargo, esto no es totalmente correcto porque para entender la aportación de este físico alemán es imprescindible tener en cuenta los trabajos que llevaron a cabo el físico Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) y el químico Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899). Ambos asentaron en bases firmes la rama de la física y de la química denominada “espectroscopía”, que se ocupa del estudio de las líneas que aparecen en los espectros de los elementos químicos. Fue Isaac Newton (1642-1727) quien durante sus investigaciones descubrió que al pasar la luz a través de un prisma de vidrio ésta se descomponía en colores diferentes (los colores del arco iris), produciendo lo que se denomina un “espectro”. Sin embargo, no se debe llamar espectroscopía a estos trabajos de Newton. Hubo que esperar a 1752, cuando Thomas Melvill se interesó por el hecho de que al calentar los cuerpos sólidos (y también los líquidos)

éstos emiten radiaciones cuando alcanzan una temperatura suficientemente alta. Melvill hizo pasar por un prisma la luz emitida por una llama producida por sodio; observó un espectro continuo, surcado por una serie de líneas brillantes. Que sepamos, fue la primera observación de un *espectro de emisión*.

Exactamente cincuenta años después de las observaciones de Melvill, esto es, en 1802, William Hyde Wollaston advirtió que en el espectro de la luz procedente del Sol aparecían unas cuantas líneas oscuras, que Newton no había detectado y que él tomó como los bordes de los colores naturales. Algunos años después (1814-1815), Joseph von Fraunhofer examinó con mucho más detalle el espectro de la luz procedente del Sol, descubriendo cerca de seiscientas rayas oscuras, que a partir de entonces se conocieron como *líneas de Fraunhofer*. Pero no se limitó al descubrimiento de nuevas rayas, sino que también se propuso establecer el lugar del espectro en que se encontraban situadas, determinando la posición de trescientas veinticuatro de ellas. Aquello sí era ya espectroscopía.

En el otoño de 1859, mientras Kirchhoff llevaba a cabo unos trabajos preliminares para una colaboración con Bunsen, realizó una observación sorprendente. Unos años antes León Foucault (1849) había establecido que las denominadas líneas D (oscuras), observadas en el espectro solar por Fraunhofer coincidían con las líneas amarillas brillantes detectadas en las llamas que contenían sodio. Este efecto se podía observar con cierta facilidad haciendo que la luz del Sol, tras atravesar una llama de sodio, llegase a un espectroscopio (instrumento compuesto, básicamente, por prismas del estilo de los que utilizó Newton); si se debilitaba suficientemente la luz solar, las líneas oscuras de Fraunhofer se veían sustituidas por las líneas brillantes provenientes de la llama. Pero el hallazgo de Kirchhoff fue advertir que si la intensidad del espectro solar aumentaba por encima de un cierto límite, las oscuras líneas D se hacían todavía más oscuras cuando se interponía una llama de sodio. Intuyó inmediatamente que se trataba de algo fundamental, aunque no sabía cómo explicar el fenómeno.

Un día después, a Kirchhoff se le ocurrió una explicación, que pronto se vio confirmada por nuevos experimentos: una sustancia capaz de emitir una cierta línea espectral posee también una gran capacidad de absorber la misma línea, por eso las líneas D, características del sodio, se hacían más oscuras cuando a la luz solar se le interponía una llama de sodio. Otra manifestación de semejante propiedad sería que la simple interposición de una llama de sodio de baja temperatura debería ser suficiente para producir artificialmente las líneas D en el espectro de una fuente de luz intensa que no las mostrase inicialmente; pero este hecho conducía a una conclusión fundamental: las líneas D (oscuras) que aparecían en el espectro solar tenían que ser debidas a que en la atmósfera del Sol existía sodio, que mediante un fenómeno de absorción originaba las mencionadas rayas espectrales.

Antes de que acabase el año, Kirchhoff informó a la comunidad científica de sus ideas, en las que continuó trabajando durante algún tiempo. Así se puede leer

en la carta que dirigió el 6 de agosto de 1860 al químico Otto Linné Erdmann, y de la que el británico Henry Roscoe publicó al año siguiente un extracto traducido al inglés en el *Philosophical Magazine*. Escribía en ella:

“Desde que remití mi Memoria a la Academia de Ciencias de Berlín, no he dejado de proseguir mis investigaciones en el mismo sentido. Había enunciado yo la ley de que una llama absorbe los mismos rayos que emite; no insistiré sobre las pruebas teóricas que he dado en confirmación de esta ley, ni sobre los experimentos que hemos hecho Mr. Bunsen y yo para demostrar que las rayas brillantes del espectro de una llama pueden servir para caracterizar los metales introducidos en esta llama; mi intención es comunicaros los resultados de mis investigaciones respecto al análisis químico de la atmósfera solar.

El Sol tiene una atmósfera gaseosa, candente, y que envuelve un núcleo cuya temperatura es todavía mucho más elevada. Si pudiésemos observar el espectro de esta atmósfera, notaríamos en él las rayas brillantes características de los metales contenidos en este medio, y por ellas podríamos determinar la naturaleza de estos metales. Pero la luz más intensa emitida por el núcleo solar no permite que el espectro de esta atmósfera se produzca directamente: obra sobre él invirtiéndole, según lo que he expuesto anteriormente; es decir, que sus rayas brillantes parecen oscuras. No vemos el espectro de la atmósfera solar por sí mismo, sino su imagen negativa. Esta circunstancia permite determinar con igual exactitud la naturaleza de los metales contenidos en esta atmósfera, para lo cual basta tener un conocimiento profundo del espectro solar, y de los producidos por cada uno de los diferentes metales.”

Las consecuencias de los argumentos y observaciones de Kirchhoff eran claras. Por primera vez era posible estudiar la composición de los cuerpos celestes sin más que analizar la luz que se recibía de ellos. En otras palabras: nacía una nueva ciencia, la Astrofísica, que permitía abordar cuestiones imposibles de resolver para la varias veces milenaria astronomía. En sus memorias, Roscoe (1906), colaborador de Bunsen durante algún tiempo en Alemania, recordaba el efecto que le suscitaron estos desarrollos: “Nunca olvidaré la impresión que me produjo mirar a través del magnífico espectroscopio de Kirchhoff, instalado en una de las habitaciones traseras del viejo edificio de la Hauptstrasse, que entonces hacía las funciones de Instituto de Física, y ver la coincidencia de las líneas brillantes en el espectro del hierro con las oscuras líneas de Fraunhofer en el espectro solar. La evidencia de que el hierro, tal y como lo conocemos en esta Tierra, está contenido en la atmósfera solar, aparece instantáneamente como concluyente. Y no han transcurrido aún cuarenta años desde que Comte, argumentando en su *Système* que los investigadores no deberían malgastar su tiempo intentando lo imposible, utilizase como un ejemplo de lo que quería decir por imposible que el conocimiento de la composición del Sol a una distancia de 91 millones de millas debía permanecer para siempre inalcanzable.” “Ya no será necesario tocar un cuerpo

para determinar su naturaleza química: bastará verlo”, escribía en 1861 el químico francés Jean-Baptiste-André Dumas. Y, por supuesto, reconocía, como reconocían todos, que se estaba ante el principio: “Lo que al día de hoy el estado de los instrumentos actuales de óptica permite efectuar respecto del Sol y las principales estrellas fijas, otros nuevos progresos permitirán que lo intente el hombre respecto de los astros más distantes y luminosos, y reconocer así por medio de qué elementos ha formado Dios los mundos que pueblan el Universo”. Treinta años más tarde, las esperanzas fundadas en el nuevo método se habían consolidado, como muestran las palabras que pronunció en su discurso como presidente de la British Association for the Advancement of Science, el astrónomo y espectroscopista William Huggins, en la reunión anual celebrada en Cardiff: “La astronomía, la más antigua de las ciencias, ha más que renovado su juventud, en ningún momento del pasado ha estado tan encendida con ilimitadas aspiraciones y esperanzas. Nunca fueron sus templos tan numerosos, ni tan grande la masa de sus devotos”.

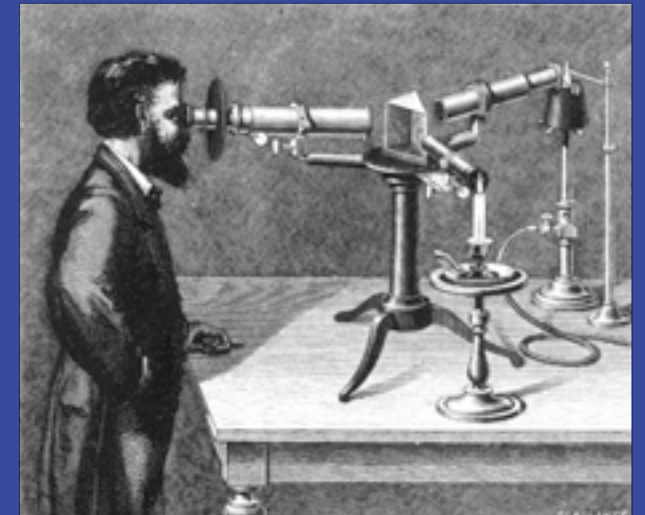
Además de poder analizar la composición de cuerpos extraterrestres, el análisis espectrográfico tenía otro uso básico, que Bunsen y Kirchhoff explicaban en un extenso artículo que publicaron en dos partes en 1860 y 1861:

“También tiene importancia el análisis del espectro bajo otro punto de vista, en cuanto puede conducir al descubrimiento de elementos todavía desconocidos. Si en efecto existen cuerpos diseminados en la naturaleza en cantidades bastante pequeñas para ocultarse a nuestros métodos comunes de análisis, puede esperarse descubrirlos por la simple inspección del espectro. La experiencia nos ha dado ocasión de confirmar esta hipótesis, puesto que fundándonos en los resultados positivos obtenidos por la observación del espectro, creemos poder afirmar con exactitud que además del potasio, del sodio y el litio, existe un cuarto metal alcalino, cuyo espectro es tan característico y tan simple como el del litio. Nuestro aparato no indica para este metal más que dos rayas, una Cs^b azul y débil, que corresponde casi a la del estroncio, Sr^d , y otra Cs^a , también azul.”

Así descubrieron un nuevo metal, al que dieron el nombre de *cesio* (símbolo Cs), “de *caesius*”, escribían, “que entre los antiguos servía para designar el azul de la parte superior del firmamento, cuyo nombre nos parece se justifica por la facilidad con que puede comprobarse con el hermoso color azul de los vapores incandescentes de este nuevo cuerpo simple, la presencia de algunas milésimas de miligramo de este elemento mezclado con la sosa, con la litina y con la estronciana.” Y también el rubidio (Rb), “de *rubidus*, que entre los antiguos servía para designar el rojo más intenso”, por el “magnífico color rojo intenso” de dos de las rayas del nuevo metal. Durante los años siguientes, otros elementos serían identificados mediante el análisis espectrográfico: el talio (William Crookes, 1861), el indio (Reich y Ritcher, 1863), el helio, detectado por Norman Lockyer en 1869 en las protuberancias solares, descubrimiento que fue confirmado (1895) en el laboratorio por William Ramsay y lord Rayleigh, el galio (Paul E. Lecoq de



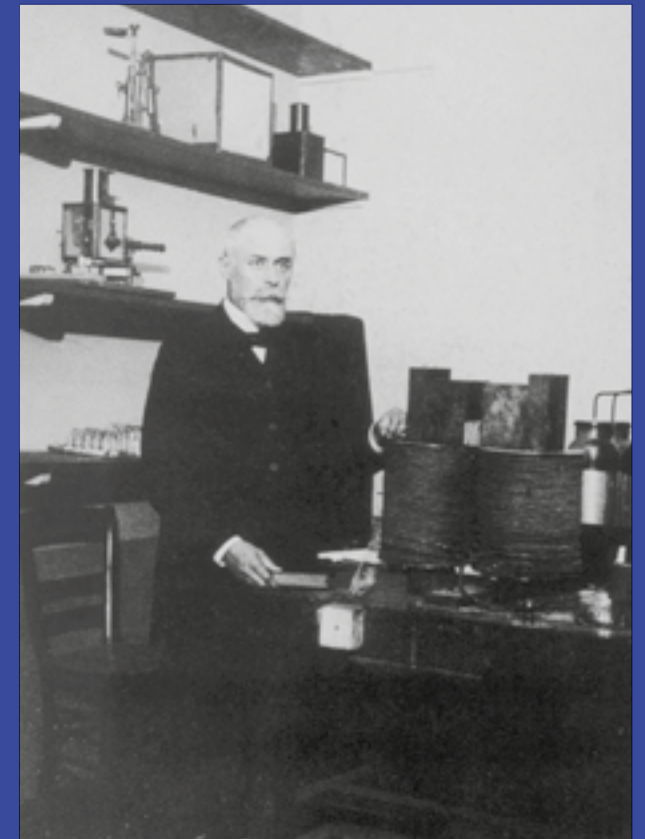
R. Bunsen, G. Kirchhoff
y H. Roscoe en 1862



Grabado mostrando un científico con un espectroscopio



Radiografía de una mano de lord Kelvin,
tomada en 1896



Henri Becquerel

Boisbaudran, 1875), el escandio (Lars F. Nilson, 1879) y el germanio (Clemens A. Winkler, 1886).

Pero siendo importante todo esto, transcendental de hecho, lo que interesa más para explicar los orígenes del trabajo de Planck en 1900 es un concepto – que representaba una propiedad específica de los cuerpos que emitían luz y calor – que Kirchhoff introdujo en 1859-1860 en el contexto de sus investigaciones espectrográficas: el de “cuerpo negro perfecto”, o de manera abreviada “cuerpo negro” (“Ich will solche *Körper vollkommen schwarze*, oder kürzer *schwarze* neenen”, escribió). Un cuerpo negro es en realidad un objeto hipotético que absorbe completamente toda la radiación térmica que le llega, y que es también un emisor perfecto de esa radiación. La radiación que emite un cuerpo negro cubre todas las longitudes de onda (distancias entre los picos, o las simas, de las ondas), pero con una radiación máxima en una longitud de onda concreta, que depende de la temperatura del cuerpo (cuando la temperatura del cuerpo aumenta, la longitud de onda máxima disminuye, lo que es tanto como decir que el inverso de aquella, la frecuencia de la radiación, crece).

El problema que inmediatamente se planteó fue el de encontrar una expresión matemática para la distribución de la energía en un cuerpo negro en función de la temperatura y la longitud de onda (o de la frecuencia). A este problema contribuyeron, además del propio Kirchhoff, físicos como Josef Stefan (1835-1803), lord Rayleigh (1842-1919), Ludwig Boltzmann (1844-1906), Wilhelm Wien (1864-1928) y James Jeans (1877-1946). Pero fue Max Planck quien encontró la expresión definitiva. Pero para entender lo que hizo Planck es preciso recordar otros descubrimientos inesperados que se produjeron en el último lustro del siglo XIX.

El riesgo de predecir el futuro

Disponiendo ya de la electrodinámica completada por James Clerk Maxwell en la década de 1860, a finales del siglo XIX se extendió entre los físicos la idea de que con la dinámica newtoniana y la electrodinámica de Maxwell quedaban completas, ahora sí, las bases teóricas para describir la naturaleza. Así, se adjudican al más que notable físico Albert Abraham Michelson (1852-1931) – recibió el Premio Nobel de Física en 1907 (fue el primer estadounidense en recibirlo) – unas frases que aparentemente pronunció en un discurso el 2 de julio de 1894, durante la inauguración del Laboratorio de Física Ryerson de la Universidad de Chicago, al menos así aparecen en el correspondiente artículo que lleva su firma: “Parece probable que la mayoría de los grandes principios básicos hayan sido ya firmemente establecidos y que haya que buscar los futuros avances sobre todo aplicando de manera rigurosa estos principios [...]. Las futuras verdades de la Ciencia Física se deberán buscar en la sexta cifra de los decimales”.

Un año después de que Michelson pronunciase estas rotundas y, a la postre, equivocadas palabras, en 1895 Wilhelm Röntgen descubría los rayos X y al año

siguiente Henri Becquerel la radiactividad, que nadie sabía cómo encajar en el aparentemente tan firme, sólido y cerrado edificio de la física conocida, la que ahora denominamos “física clásica”. En definitiva, predecir el futuro es arriesgado y los sólidos cimientos de la física se empezaron a tambalear.

Rayos catódicos y rayos X

En 1709, Francis Hauksbee “el viejo”, *curator* (conservador) de experimentos y constructor de instrumentos para la Royal Society de Londres, publicaba un libro titulado *Physico-Mechanical Experiments on Various Subjects* en el que señalaba que había observado que si se agitaba un recipiente de vidrio del que se había extraído el aire e introducido algunas gotas de mercurio, aparecía un resplandor fosforescente. De hecho, las experiencias de Hauksbee fueron estimuladas por fenómenos parecidos detectados con anterioridad en los tubos barométricos (en los que se había generado algún vacío) de Evangelista Torricelli. Por ejemplo, en 1675 el astrónomo Jean Picard advirtió en la oscuridad de su observatorio de París que cuando movía barómetros, a veces, se producía un misterioso halo luminoso por encima del nivel de la columna oscilante de mercurio.

Hauksbee pudo llevar a cabo estos experimentos porque disponía de una bomba de vacío, un aparato que había desarrollado principalmente Otto von Guericke hacia 1647. Sin embargo, se avanzó poco en este campo hasta mediados del siglo siguiente. Hacia 1855, Heinrich Geissler, un mecánico y experto soplador de vidrio de Bonn habilidoso en la construcción de instrumentos científicos diseñó una nueva bomba de vacío que utilizaba mercurio y que extraía con gran eficacia el aire de unos tubos de vidrio, en cuyos extremos introducía electrodos, a los que aplicaba elevados voltajes eléctricos, obteniendo efectos luminosos de gran belleza (los colores variaban según el gas utilizado).

En el siglo de la electricidad, no es sorprendente que semejante dispositivo experimental fuese utilizado también por físicos y químicos para estudiar las características de los gases utilizados, así como la relación existente entre gas y electricidad. Uno de estos científicos fue Julius Plücker, quien en 1858, durante sus investigaciones espectroscópicas, encontró que según iba extrayendo el gas del tubo, la luminosidad que lo llenaba en un principio (producida por la diferencia de potencial existente entre los electrodos) disminuía progresivamente hasta que el cátodo aparecía rodeado por una delgada “envoltura” luminosa, de color variable dependiendo de la naturaleza del gas introducido en el tubo. Esta envoltura estaba separada del cátodo por un espacio oscuro, tanto más extenso cuanto mayor era el enrarecimiento de la atmósfera interior. Cuando la presión del gas disminuía a una millonésima de atmósfera, el espacio oscuro invadía todo el tubo, no observándose otra cosa que un pequeño círculo de luz violeta en el extremo del cátodo, a la vez que el vidrio adquiría una intensa fosforescencia en la parte opuesta.

Tras los trabajos de Plücker, un estudiante suyo, Wilhelm Hittorf, junto con Eugen Goldstein demostraron (el primero con un cátodo en forma de punta) que un objeto colocado en la línea del cátodo daba lugar a una sombra bien definida en la envoltura luminosa, lo que sugería que lo que surgía del cátodo eran rayos que viajaban en línea recta. De ahí que de hablar de *emisión catódica*, se terminase utilizando la expresión, introducida en 1876 por Goldstein, de *Kathodenstrahlen*, *rayos catódicos* (Hittorf utilizó el término *Glimmstrahlen*).

Qué eran en realidad esos *Kathodenstrahlen* fue una pregunta que tardó en ser contestada. La respuesta llegó en 1897, de la mano del director del Laboratorio Cavendish de Cambridge, Joseph John Thomson (1856-1940), quien demostró que consistían en corrientes de partículas cargadas, de *electrones* (él las llamó simplemente “corpúsculos”).

Otro físico que se dedicó a estudiar los rayos catódicos, antes incluso de que Thomson dilucidara su estructura, fue Wilhelm Konrad Röntgen (1845-1923). En junio de 1894, Röntgen, catedrático desde 1888 en la Universidad de Wurzburg, comenzó a trabajar en lo que para él era entonces un nuevo campo de investigación: el de los rayos catódicos. En el curso de sus investigaciones, el 8 de noviembre de 1895, encontró una radiación que podía atravesar cuerpos opacos, a la que bautizó como “rayos X”, ya que ignoraba su naturaleza. En una entrevista que concedió a un periodista, Röntgen dio algunos datos relacionados con su descubrimiento, que merece la pena reproducir: “No hacía mucho que había comenzado con mis ensayos, cuando observé algo nuevo. Trabajaba con un tubo de *Hittorf-Crook* envuelto completamente en un papel negro. Sobre la mesa, al lado, estaba colocado un trozo de papel indicador de platinocianuro de bario. Hice pasar a través del tubo una corriente y noté una curiosa línea transversal sobre el papel [...] El efecto era tal que, con arreglo a las ideas de entonces, solamente podía resultar de la radiación de la luz. Pero era totalmente imposible que la luz proviniera de la lámpara, puesto que, indudablemente, el papel que la envolvía no dejaba pasar luz alguna, ni siquiera la de una lámpara de arco”.

El 28 de diciembre, Röntgen presentó el manuscrito de la primera de las tres comunicaciones que preparó para la Sociedad Física y Médica de Wurzburg: “Sobre un nuevo tipo de rayos”. Y el 1 de enero de 1896 ya disponía de separatas que envió, junto a copias de fotografías que había obtenido – algunas de las cuales se harían famosas; en especial la de la mano de su esposa, tomada el 22 de diciembre – a los principales científicos europeos. El segundo artículo vio la luz en marzo de 1896.

Al igual que ocurría con los rayos catódicos, la naturaleza de los rayos X fue intensamente debatida desde el principio. La mayor parte de los físicos pensaba que era algún tipo de radiación electromagnética, opinión que el propio Röntgen compartía. Sin embargo, existían evidencias que apuntaban en la dirección de que no se comportaban como los rayos de luz ordinaria. La comprobación de la natu-

raleza de los rayos X tardaría más de una década en llegar. Fue en 1912, cuando el 21 de abril y en el Instituto de Física Teórica de la Universidad de Múnich, Walter Friedrich y Paul Knipping observaron, siguiendo una propuesta de un antiguo doctorando de Planck, Max von Laue (1879-1960), la difracción de los rayos X por un cristal. La idea de que un cristal estaba formado por moléculas o átomos distribuidos a lo largo y ancho de una red espacial era por entonces ampliamente conocida y aceptada, de manera que la contribución auténticamente original fue asociar experimentalmente estas estructuras cristalinas con los rayos X, para clarificar así la naturaleza de ambos. Si los rayos X eran ondas electromagnéticas de longitud de onda pequeña, y si los cristales estaban formados por átomos distribuidos de manera regular en el espacio, con distancias pequeñas entre ellos, entonces, al ser los tamaños implicados similares, se debían producir interferencias al hacer incidir los rayos sobre el cristal. Midiendo distancias entre los máximos de intensidad en el diagrama de interferencia, se podría calcular, como se hacía en la óptica ordinaria, la longitud de onda de los rayos X. Esto es lo que se hizo: se irradió con rayos X un cristal de sulfato de cobre, obteniéndose puntos negros distribuidos periódicamente en una placa fotográfica colocada detrás del cristal.

La radiactividad

Las noticias del descubrimiento de los rayos X circularon con rapidez por todo el mundo. Las evidentes aplicaciones médicas de la nueva radiación contribuyeron mucho a la popularidad que enseguida adquirieron (antes de un año algunos hospitales ofrecieron servicios de radiología). En Francia la noticia también se conoció pronto, en los periódicos al igual que en instituciones como la prestigiosa Académie des Sciences, que dedicó su reunión del 20 de enero de 1896 a estudiar el tema. En esta sesión, dos médicos, Oudin y Barthélemy, presentaron una fotografía que habían tomado de los huesos de una mano utilizando rayos X. El matemático Henri Poincaré, que había recibido del propio Röntgen copias de algunas de sus fotografías, fue el encargado de hacer la presentación en aquella sesión de la Academia, a la que también llevó un ejemplar del artículo de Röntgen. Llamó entonces la atención a la posible conexión entre los rayos X y la fluorescencia.

Entre los que asistieron a la sesión de la Academia de Ciencias del 20 de enero se encontraba Henri Becquerel (1852-1908), catedrático de Física en el Museo de Historia Natural de París. Interesado por las noticias que se comunicaron allí sobre los hallazgos de Röntgen y disponiendo como disponía en el Museo de sales de uranio que mostraban propiedades fosforescentes, recurrió a ellas para ver si producían rayos X. El 24 de febrero, poco más de un mes después de la reunión de enero, y escasamente cuatro después del descubrimiento de Röntgen, Becquerel presentó a la Académie una primera comunicación, “Sobre las radiaciones emitidas por fosforescencia”, en la que sostenía que los rayos emitidos por el sulfato doble de uranio y potasio, una sustancia fosforescente, impresionaban, a través de

una espesa envoltura de papel, una placa fotográfica. Parecía, efectivamente, que la fosforescencia iba acompañada de rayos X. Sin embargo, una semana más tarde, el 2 de marzo, la Académie recibía otra comunicación de Becquerel, esta vez con un contenido mucho más sorprendente. El día 26 de febrero se había visto obligado a interrumpir sus experiencias con las sales de uranio debido a que estaba nublado y no salió el sol. Como tenía la placa fotográfica protegida por una envoltura y la sal de uranio preparada, las guardó en un cajón, esperando que al día siguiente saliese el sol y pudiese exponer la sal a su luz. Como el tiempo no cambió en varios días, el 1 de marzo Becquerel optó por revelar la placa fotográfica, esperando encontrar imágenes débiles. Sorprendentemente, encontró perfiles muy intensos. Sin la intervención de la luz solar, sin ninguna fosforescencia o fluorescencia visible, el compuesto de uranio había emitido una radiación capaz de impresionar la placa. Por qué, era algo que Becquerel desconocía.

En la siguiente sesión de la Academia, celebrada el 9 de marzo, Becquerel informaba que además de oscurecer placas fotográficas, la nueva radiación ionizaba los gases, haciéndoles conductores; un hallazgo que permitía determinar, recurriendo a un instrumento que midiese corrientes eléctricas, la “actividad” de una muestra. También indicaba que por entonces había mantenido sus cristales en la oscuridad durante 160 horas, sin que se produjese ningún debilitamiento en la radiación que emitían. Asimismo, había reducido la lista de sustancias que emitían la nueva radiación a únicamente compuestos de uranio, con dos sorprendentes excepciones: un par de muestras de sulfato de calcio, que por alguna razón que aún hoy se ignora, producían imágenes a través de 2 mm de aluminio.

Todos estos resultados forman en realidad lo sustancial del descubrimiento de la radiactividad. Becquerel continuó estudiando las propiedades de la nueva radiación, publicando más notas en las *Comptes rendus* del 23 y 30 de marzo, pero la esencia del descubrimiento estaba completa. Todos los resultados que obtenía le inducían a pensar que las emisiones procedían del uranio: “Todas las sales de uranio que he estudiado”, escribía en una de sus notas, “ya sean fosforescentes o no con respecto a la luz, estén cristalizadas, fundidas o en solución, han dado resultados comparables. Esto me ha conducido a pensar que el efecto es debido a la presencia en estas sales del elemento uranio, y que el metal daría efectos más intensos que los compuestos” Comprobó, asimismo, que la actividad de las muestras no se debilitaba aunque transcurriera mucho tiempo: “Desde el 3 de marzo al 3 de mayo, estas sustancias se mantuvieron encerradas en un caja de cartón opaco. Desde el 3 de mayo, han sido colocadas en una doble caja de plomo que nunca abandona la cámara oscura [...] Bajo estas condiciones, las sustancias continúan emitiendo radiaciones activas”. Y no sabía explicar el porqué de este sorprendente fenómeno, al que se refirió como un “tipo de fosforescencia invisible”.

A pesar de lo que estemos tentados de pensar más de un siglo después, en su momento el descubrimiento de Becquerel no atrajo excesiva atención; los ra-

yos X seguían en la cresta de la ola de la popularidad. La persona responsable de que todo esto cambiase fue una mujer de origen polaco, Marie Sklodowska-Curie (1867-1934).

Licenciada en Física y Matemática por la Sorbona, y casada con Pierre Curie (1859-1906), entonces profesor de Física en la École Municipale de Physique et de Chimie Industrielles de la ciudad de París, Marie Curie decidió doctorarse, y no encontró mejor tema que el de estudiar un fenómeno descubierto no hacía mucho por Henri Becquerel. Lo que hizo Marie Curie en aquellas sus primeras investigaciones en el campo de la radiactividad fue, por un lado, estudiar la conductividad del aire bajo la influencia de la radiación emitida por el uranio y, por otra parte, buscar si existían otras sustancias, aparte de los compuestos del uranio, que convirtiesen el aire en conductor de la electricidad. El procedimiento experimental era, en principio, sencillo: colocaba el material a estudiar sobre una placa metálica frente a la que se encontraba otra placa, también de metal, que hacía las veces de condensador; utilizaba entonces el electrómetro de cuarzo piezoeléctrico (desarrollado por su esposo y el hermano de éste), para comprobar si pasaba alguna corriente eléctrica por el aire existente entre las placas. Cuanto mayor fuese la intensidad de esa corriente, mayor la “actividad” radiactiva de la sustancia.

En sus experimentos, Marie se había encontrado con una sustancia especialmente llamativa: “de los minerales que se han mostrado activos, todos contienen elementos activos. Dos minerales de uranio: la pechblenda (óxido de uranio) y la calcolita (fosfato de cobre y de uranio) son mucho más activos que el propio uranio. Este hecho es muy sorprendente e induce a creer que estos minerales pueden contener un elemento mucho más activo que el uranio”. Había que intentar aislar el o los elementos que creía haber detectado indirectamente en esos minerales. Con la colaboración de Pierre, tras tres meses de trabajo, anunciaron la existencia de un nuevo elemento químico: el polonio. En efecto, fue el 18 de julio (1898) cuando presentaban en la Académie des Sciences su artículo: “Sobre una nueva sustancia radiactiva, contenida en la pechblenda”. Es, por cierto, la primera vez que se utilizó la expresión *radiactiva*; esto es, activa en radiación, que emite radiaciones. Marie y Pierre introducían también el término *radiactividad*.

Durante las investigaciones que les condujeron al descubrimiento del polonio, el matrimonio Curie halló indicios de que efectivamente, acompañando al bario separado de la pechblenda podía existir otro elemento. Pero, para continuar avanzando, los Curie pensaron que necesitaban más conocimientos y habilidades químicas que las que ellos poseían y, en consecuencia, solicitaron la ayuda de Gustave Bémont, un químico que entonces era jefe de los trabajos de química mineralógica en la École de Physique et Chimie Industrielles. Tras varios meses más de duro trabajo fueron capaces de separar ese segundo nuevo elemento, al que denominaron “radio”, que después demostró ser más importante que el polonio y mucho más difícil de obtener. Tras otros cuatro años de trabajo, los Curies sólo

pudieron separar 100 miligramos de ese nuevo elemento, con bastante pureza, a partir de varias toneladas de mena de uranio. No es extraño, por consiguiente, que su precio fuese muy elevado: en 1921, por ejemplo, un gramo de radio costaba 100.000 dólares. Sin embargo, sus características justificaban semejante valor. Su periodo de desintegración (el tiempo que tarda en reducirse a la mitad el número de núcleos de una muestra) es de 1.602 años, frente a los sólo 138 días del polonio y los casi 4.500 millones de años del uranio-238. El radio es, por tanto, una fuente de radiación estable durante cientos de años, y tiene, además, una intensidad 3.000 veces superior a la de una cantidad igual de uranio. En otras palabras, su combinación de una vida activa larga y una intensidad elevada es mucho mejor que la de cualquier otro elemento o sustancia radiactiva.

Para los pioneros de la radiactividad, al igual que para todos aquellos que se interesaban de una u otra manera por ella, se trataba de un fenómeno sorprendente, inexplicable con la física y química conocida entonces. Era inevitable que los científicos de la época se preguntasen cuál era su origen, y, en consecuencia, que se produjeran todo tipo de reacciones. Sin entrar en un análisis general, es posible identificar tres fases en la historia de la explicación de la radiactividad. La primera duró hasta 1903, y en ella la principal cuestión tratada fue si la radiactividad era una propiedad atómica de la materia o si, por el contrario, era producida por un agente externo. Aquel periodo terminó con la aceptación general de que la primera posibilidad, la de que se trataba de un fenómeno atómico, era la correcta, aunque no por ello dejase de considerarse ocasionalmente la segunda opción. La siguiente fase cubre, aproximadamente, la década de 1903 a 1913, y en ella el objetivo más perseguido fue encontrar algún modelo atómico que pudiese explicar la radiactividad. Los continuos fracasos en este sentido terminaron por producir un ambiente científico en el que la cuestión del origen de la radiactividad dejó de plantearse – o por lo menos de plantearse con la frecuencia, convicción e intensidad de antes –, convenciéndose la mayoría de los físicos (no todos, por supuesto) que la respuesta llegaría en el futuro, cuando se dispusiese de esquemas conceptuales, de teorías, más poderosas. La mecánica cuántica sería semejante “esquema conceptual”: en 1928, George Gamow y, de manera independiente, Ronald Gurney y Edward Condon demostraron que la física cuántica suministraba una explicación satisfactoria, aunque no totalmente completa, de las emisiones radiactivas. Eso sí, con anterioridad había ayudado a comenzar a comprenderse la naturaleza de la radiactividad, una contribución de un entonces joven y desconocido empleado de la Oficina de Patentes de Berna, de nombre Albert Einstein, publicada en 1905: el artículo que contiene la célebre ecuación $E=mc^2$, donde E representa la energía, m la masa y c la velocidad de la luz.

Revisados brevemente esos descubrimientos inesperados que se produjeron en el último lustro del siglo XIX, ha llegado el momento de retornar a Max Planck y sus aportaciones.

Max Planck

Max Karl Ernst Ludwig Planck nació en 1858, en Kiel, en cuya universidad su padre, Johann Julius Wilhelm von Planck, era profesor de Derecho. El prestigio y autoridad que Planck llegaría a alcanzar en la comunidad científica alemana, y mundial, no responde tanto a sus capacidades científicas – que desde luego tuvo – como a su diligencia, rectitud y fortaleza de carácter; se le puede considerar como un científico capaz, muy capaz, pero lejos de la categoría de un Einstein, un Bohr, un Rutherford o un Heisenberg, por poner algunos ejemplos de entre sus contemporáneos.

Cuando le llegó el momento de elegir carrera universitaria, el joven Max dudó entre música, filología antigua y física. A pesar de que el físico de Múnich Philipp von Jolly le aconsejó que no estudiara física, ya que todo estaba descubierto después de que los principios de la termodinámica hubiesen sido establecidos, y ya sólo quedaban algunas lagunas por completar, Planck eligió finalmente seguir la carrera de Física en la Universidad de Múnich, estudios que comenzó en el semestre de invierno de 1874-75. Encontramos algunas claves que explican esa decisión en una carta que Planck escribió muchos años después, el 14 de diciembre de 1930, a Joseph Strasser: “Yo podría haberme convertido también en un filólogo o en un historiador. Lo que me llevó a las ciencias exactas surgió de circunstancias más bien externas: un curso de matemáticas del profesor Gustav Bauer, al que asistí, en la universidad, suscitó en mí una gran satisfacción interior y me abrió nuevos horizontes. El hecho de que terminase pasándome de las matemáticas puras a la física tuvo que ver con mi pasión por las cuestiones relativas a la concepción del mundo; cuestiones que, sin duda, no podían ser resueltas por las matemáticas.”

Desde 1877 y hasta 1879, continuó sus estudios en Berlín, donde pudo seguir los cursos de tres gigantes de la ciencia: el fisiólogo y físico Hermann von Helmholtz, el matemático Karl Weierstrass y Gustav Kirchhoff. La enseñanza, sin embargo, dejaba que desear, Planck recordaría en su autobiografía científica: “Helmholtz no preparaba sus clases; se interrumpía constantemente para buscar en un cuaderno los datos necesarios; por otra parte, cometía constantemente errores de cálculo en la pizarra, y daba la impresión de aburrirse tanto como nosotros en su curso.” Kirchhoff sí preparaba con cuidado sus lecciones: “cada frase estaba en su lugar. No faltaba ninguna palabra, no sobraba nada. Pero daba la impresión de que todo estaba aprendido de memoria, lo que le convertía en árido y monótono. Admirábamos al orador, pero no lo que decía”. En semejantes circunstancias, “el único recurso que me permitía satisfacer mi sed de conocimientos era leer las obras que me interesaban; se trataba, bien entendido, de las que se relacionaban con el principio de energía. Fue así como descubrí los tratados de Rudolf Clausius, cuya claridad me impresionó profundamente y en los que me sumergí con entusiasmo creciente. Admiraba especialmente la formulación exacta que daba de

los dos principios de la termodinámica [el de la conservación de la energía y el del crecimiento de la entropía] y la relación existente entre ellos.”

Clausius formó, junto a Helmholtz y Kirchhoff, no importa lo poco atractivas que le resultasen las clases de éstos, los pilares sobre los que construyó su saber físico: “Todos mis conocimientos los debo exclusivamente a la lectura de nuestros maestros”, manifestó en la conferencia inaugural que pronunció, el 28 de junio de 1894, al tomar posesión de su cátedra en la Universidad de Berlín, “entre los cuales rindo tributo sobre todo a los nombres de Hermann von Helmholtz, Rudolf Clausius y Gustav Kirchhoff.”

Tras presentar en 1880 la correspondiente Habilitación, Planck pudo enseñar, como *privatdozent*, en Múnich. En 1885, y contando ya en su haber con publicaciones de cierta notoriedad (especialmente un artículo en el que estudiaba el equilibrio termodinámico de mezclas de gases, 1883), fue designado profesor extraordinario (esto es, sin cátedra) de Física en la Universidad de Kiel, sustituyendo a Heinrich Hertz, el discípulo favorito de Helmholtz. (Hertz, para quien la Universidad de Kiel estaba preparando convertir el puesto de profesor extraordinario que ocupaba en el de catedrático, aceptó una oferta de Karlsruhe, en donde, en 1888, llevó a cabo su gran aportación a la física: la demostración experimental de la existencia de ondas electromagnéticas de baja frecuencia, que se deducía de la teoría del electromagnetismo de Maxwell.)

En Kiel, la carrera científica de Planck, centrada en el segundo principio de la termodinámica (el del crecimiento de la entropía), continuó avanzando. Después de cuatro años allí, con su currículum ya ampliado con un libro (dedicado al principio de conservación de la energía, una de sus grandes pasiones científicas; 1887), le llegó una magnífica oportunidad: de la Universidad de Berlín, la universidad de la capital de Prusia, centro neurálgico del nuevo Imperio alemán, que iba camino de convertirse también en una de las capitales del mundo. Una vez más a quien Berlín realmente quería era a Hertz, pero éste aceptó una oferta de Bonn (algo que, por cierto, muestra que, por entonces, la posición de Berlín en el contexto de la ciencia germana, aunque importante, no era del indiscutible liderazgo que alcanzaría no mucho tiempo después). Eligieron a Planck aunque como profesor extraordinario. Tres años después, en 1892, recibió el nombramiento de catedrático. Y dos años más tarde, con el apoyo del propio Helmholtz, fue elegido miembro ordinario de la Academia Prusiana de Ciencias. Llegaba a la cumbre de su profesión. En Berlín pasaría el resto de su vida, y en Berlín, en diciembre de 1900, lograría su gran éxito científico: la introducción de los cuantos de energía.

La discontinuidad cuántica: Planck y Einstein

Planck había estado interesado en el problema de la radiación del cuerpo negro desde hacía tiempo, pero intentaba resolverlo recurriendo a la electrodinámica de

Maxwell. Era razonable que hiciera esto, puesto que ¿no eran las radiaciones del cuerpo negro sino un tipo de ondas electromagnéticas? Pero no tenía éxito, hasta que un día recibió una información muy valiosa de unos colegas que trabajaban en el Instituto Imperial Físico-Técnico (Physikalisch-Technische Reichsanstalt; PTR), en cuya fundación había sido fundamental Werner Siemens (1816-1892). Industrial, científico e inventor, Siemens, que había conseguido su fortuna principalmente en el campo de la industria de la electricidad, quería devolver algo a su país y pensó en un instituto que se dedicara a investigaciones relacionadas con la física. Para ello aportó el dinero necesario para la construcción y diseño de ese instituto, que se ubicó en Charlottenburgo, entonces una pequeña población residencial situada a unos 3 kilómetros de la Puerta de Brandemburgo de Berlín. En principio, el PTR se debía ocupar de investigar sobre cualquier tipo de problema físico y tecnológico, además de desarrollar y comprobar instrumentos y elaborar sistemas de unidades; sin embargo, para evitar lo que se consideraba una competencia desleal se llegó al acuerdo de limitar el rango de los trabajos a efectuar a aquellas áreas o problemas que no entrasen en conflicto con lo que se estaba estudiando en universidades, escuelas politécnicas, industria privada u otras agencias estatales. Este acuerdo significó que el nuevo instituto se dedicaría sobre todo a la metrología (establecimiento y comprobación de unidades de medida), un apartado especialmente atractivo para la industria, ya que disponer de unidades precisas era comercialmente muy conveniente: la exportación se veía favorecida cuando los productos fabricados cumplían especificaciones técnicas comunes a cuantas más naciones mejor, y Alemania era una potencia industrial que quería exportar.

El Instituto comenzó a funcionar en 1887, con Hermann von Helmholtz de presidente (en 1895 le sucedió Friedrich Kohlrausch). Estaba organizado en dos secciones, una científica, que fue la primera en contar con instalaciones propias, y otra tecnológica, que tardó algo más en tener sus edificios. Fue la primera institución tipo “laboratorio nacional” que existió, siendo el modelo adoptado después por Gran Bretaña y Estados Unidos.

Entre las preocupaciones del Instituto Imperial estaba los estudios fotométricos, esto es, la determinación de cantidades que describiesen las propiedades de la luz. En marzo de 1888, a los pocos meses de la inauguración del Instituto, la Deutscher Verein für Gas- und Wasserfachmänner (Asociación alemana de especialistas del gas y el agua) pidió al PTR, a través del Ministerio del Interior, ayuda para evaluar las unidades aceptadas por entonces para la intensidad lumínica, y si fuese posible, que estableciese una unidad que fuese aceptada internacionalmente. Helmholtz acogió con entusiasmo la idea, más aun teniendo en cuenta que la Marina estaba interesada en mejorar los instrumentos fotométricos que utilizaba y en superar los problemas de pérdida de luminosidad bajo condiciones meteorológicas adversas. Investigando este problema, Otto Richard Lummer y Ernst Pringsheim descubrieron que las medidas que se obtenían mostraban que, para longitudes de onda grandes, se producían desviaciones sistemáticas con respecto

a la ley de radiación de un cuerpo negro que entonces se manejaba (la debida a Wilhelm Wien). Poco después, Heinrich Rubens y Ferdinand Kurlbaum demostraban inequívocamente que así era (presentaron sus resultados en la Academia de Ciencias de Berlín el 25 de octubre de 1900). Nada más completar sus medidas, y antes de publicarlas, Rubens informó a Planck, en la vecina Universidad de Berlín, de los resultados. El mismo día (7 de octubre) Planck reconstruía la derivación de la ley, teniendo en mente las nuevas medidas, y llegaba a una nueva ley de radiación.

Planck presentó este resultado en la sesión de la Sociedad de Física de Berlín que tuvo lugar el 19 de octubre. Al día siguiente, Rubens le informaba, según recordó el propio Planck en su autobiografía, que “la noche anterior, tras levantarse la reunión, había cotejado rigurosamente mi fórmula con los datos de sus mediciones, encontrando en todo momento una satisfactoria concordancia. También Lummer y Pringsheim, quienes al principio creían haber detectado discrepancias, retiraron poco después sus objeciones, pues, como me confesó el propio Pringsheim, se demostró que las desviaciones encontradas se debían a un error de cálculo. Mediciones posteriores confirmaron una y otra vez la fórmula de la radiación, y, por cierto, con tanta mayor exactitud cuanto más precisos fueron los métodos de medición empleados.” La nueva ley de radiación se ajustaba perfectamente a los resultados experimentales. Casi inesperadamente, como por sorpresa, Planck se encontró con que disponía de una aparentemente correcta ley de distribución para la radiación del cuerpo negro, cuya explicación teórica, sin embargo, ignoraba (la modificación heurística que había realizado no significaba una auténtica explicación teórica).

Inmediatamente, Planck se dedicó a la tarea de explicar teóricamente esa ley, lográndolo poco después, en diciembre. Fue entonces cuando se vio obligado a escribir la ecuación que codificaba ese hecho, la célebre: $E=h \cdot \nu$, donde E representa la energía del sistema, h es una constante, hoy llamada “constante de Planck”, y ν la frecuencia de la radiación. Más de treinta años después, en una carta que escribió el 7 de octubre de 1931 al físico estadounidense Robert Williams Wood, Planck recordó que, “resumido brevemente, se puede describir lo que hice como un acto de desesperación. Por naturaleza soy pacífico y rechazo toda aventura dudosa. Pero por entonces había estado luchando sin éxito durante seis años (desde 1894) con el problema del equilibrio entre radiación y materia y sabía que este problema tenía una importancia fundamental para la física; también conocía la fórmula que expresa la distribución de la energía en los espectros normales. Por consiguiente, había que encontrar, costase lo que costase, una interpretación teórica. Tenía claro que la física clásica no podía ofrecer una solución a este problema, puesto que con ella se llega a que a partir de un cierto momento toda la energía será transferida de la materia a la radiación. Para evitar esto se necesita una nueva constante que asegure que la energía no se desintegre. Pero la única manera de averiguar cómo hacer esto es partiendo de un punto de vista definido.



Wilhelm Roentgen, 1915

Marie Curie realizando medidas con un electrómetro de cuarzo piezoeléctrico



Pierre y Marie Curie en su laboratorio

Primer Congreso Solvay, 1911



En mi caso, el punto de partida fue el mantener las dos leyes de la termodinámica. Hay que conservar, me parece, estas dos leyes bajo cualquier circunstancia. Por lo demás, estaba dispuesto a sacrificar cualquiera de mis convicciones anteriores sobre las leyes físicas. Boltzmann había explicado cómo se establece el equilibrio termodinámico mediante un equilibrio estadístico, y si se aplica semejante método al equilibrio entre la materia y la radiación, se encuentra que se puede evitar la continua transformación de energía en radiación suponiendo que la energía está obligada, desde el comienzo, a permanecer agrupada en ciertos cuantos. Esta fue una suposición puramente formal y en realidad no pensé mucho en ella.”

El “acto de desesperación” al que se refería fue, como él mismo señalaba, adoptar la formulación estadística de la entropía propuesta por Ludwig Boltzmann en 1877: la célebre expresión para la entropía de un sistema, $S=k \cdot \ln W$, donde k es una constante (introducida precisamente por Planck posteriormente y denominada “constante de Boltzmann”) y $\ln W$ el logaritmo neperiano de la probabilidad de que tenga lugar el estado en cuestión; en palabras del propio Boltzmann cuando introdujo en 1877 esta formulación: “El estado inicial de un sistema será, en la mayoría de los casos, un estado muy poco probable y el sistema tenderá siempre hacia estados más probables, hasta llegar al estado más probable, es decir, al estado de equilibrio termodinámico. Si aplicamos esto al segundo principio de la termodinámica, podemos identificar la magnitud que se acostumbra a llamar entropía, con la probabilidad del estado correspondiente. Consideremos por tanto un sistema de cuerpos que esté aislado [y cuyo estado no se modifica más que por la interacción entre los cuerpos que lo constituyen]. En una transformación de este tipo, la entropía total del sistema no puede más que aumentar en virtud del segundo principio de la termodinámica. En nuestra interpretación actual esto no significa otra cosa que el hecho de que la probabilidad del estado del conjunto de los cuerpos del sistema debe ir aumentando constantemente: el sistema no puede pasar más que de un estado a un estado más probable”. Y más adelante: “Esta medida de la permutabilidad coincide con la entropía, salvo en un factor y una constante”.

El uso de “probabilidades” y de nociones como “el estado del conjunto de los cuerpos” implicaba claramente que se podrían producir violaciones transitorias del segundo principio de la termodinámica. Doblearse ante semejante planteamiento, aceptar que el crecimiento de la entropía estaba asociado con probabilidades y que, por consiguiente, no era tan universal como él pensaba, debió ser doloroso para un físico del talante de Planck, dolor sólo mitigado haciendo de este paso una “suposición puramente formal”. En otras palabras, Planck se resistió de entrada a apoyar la idea de que este resultado significaba que, de alguna manera, la radiación electromagnética (esto es, la luz, una onda *continua* como se suponía hasta entonces) se podía considerar también como formada por “corpúsculos” (posteriormente denominados “fotones”) de energía $h \cdot \nu$.

Fue entonces el desconocido empleado de la Oficina de Patentes de Berna de nombre Albert Einstein (1879-1955) quien sostuvo que la discontinuidad de energía que había encontrado Planck era real, aunque sin duda problemática. Presentó su idea en un artículo que publicó en 1905 en la revista *Annalen der Physik* titulado “Un punto de vista heurístico sobre la producción y transformación de la luz”. Utilizando un análisis estadístico, Einstein concluía que “las observaciones asociadas con la radiación del cuerpo negro, la fluorescencia, la producción de rayos catódicos mediante luz ultravioleta y otros fenómenos relacionados, todos ellos conectados con la emisión o transformación de la luz, se entienden más fácilmente si se supone que la energía de la luz está distribuida espacialmente de forma discontinua.” Se trataba de una tesis radical, que rompía con el cuerpo de conocimientos canónicos de la física. Explicaba, es cierto, algunos fenómenos problemáticos desde el punto de vista de la física clásica (como el efecto fotoeléctrico) pero si, de alguna manera, la luz estaba formada por “partículas” de energía, entonces: ¿por qué la teoría ondulatoria de la luz ha tenido tanto éxito hasta ahora?, o, ¿cómo se podían incorporar al nuevo esquema “cuántico” fenómenos del tipo de la interferencia o la difracción? La respuesta – el comentario más bien – de Einstein a estos interrogantes se encuentra en la introducción del trabajo, donde escribía:

“La teoría ondulatoria de la luz, que opera con funciones continuas en el espacio, ha funcionado bien en la representación de fenómenos puramente ópticos y probablemente nunca será reemplazada por otra teoría. Debe tenerse en cuenta, sin embargo, que las observaciones ópticas se refieren a medias temporales más que a valores instantáneos, y a pesar de la completa verificación experimental de la teoría de la difracción, reflexión, refracción, dispersión, etc., es imaginable que una teoría de la luz que utilice funciones continuas en el espacio conduzca a contradicciones con la experiencia, si se aplica a los fenómenos de la producción y la transformación de la luz.”

De esta manera, aparecía la primera de las propiedades contraintuitivas de la física cuántica, la “dualidad onda-corpúsculo”, que desarrollaría en 1923-1924 Louis de Broglie. Por una pequeña parte del contenido de este artículo – aplicar los cuantos para explicar el efecto fotoeléctrico – Einstein recibió el premio Nobel de Física de 1922.

Pero pocos creyeron al principio en la tesis de Einstein; ejemplo de semejante resistencia es lo que manifestó Robert Millikan en 1949: “Me pasé diez años de mi vida comprobando la ecuación de Einstein de 1905 [la del efecto fotoeléctrico], y contrariamente a todas mis expectativas me vi obligado en 1915 a proclamar su indudable verificación experimental, a pesar de lo irrazonable que era, ya que parecía violar todo lo que sabíamos acerca de la interferencia de la luz.”

Richard Feynman expresó bien el carácter revolucionario de la dualidad onda-corpúsculo (comprobada experimentalmente en 1924 por Clinton Davisson y

Lester Germer, por un lado, y George Thomson y Alexander Reid, por otro) en uno de sus libros, *Six Easy Pieces* (1995):

“La ‘mecánica cuántica’ es la descripción del comportamiento de la materia en todos sus detalles y, en particular, de lo que sucede a escala atómica. Las cosas a una escala muy pequeña no se comportan como nada de lo que ustedes tengan experiencia directa. No se comportan como ondas, no se comportan como partículas, no se comportan como nubes, o como bolas de billar, o como pesos colgados de muelles, o como nada que ustedes hayan visto alguna vez.

Newton pensaba que la luz estaba hecha de partículas, pero luego se descubrió que se comporta como una onda. Sin embargo, posteriormente (a comienzos del siglo xx) se encontró que la luz sí se comporta como una partícula, y luego se encontró que en muchos aspectos se comportaba como una onda. Así que realmente no se comporta como ninguna de las dos cosas. Ahora hemos cedido. Decimos: ‘No es *ni* una cosa *ni* otra’.

Hay, no obstante, una feliz circunstancia: los electrones se comportan exactamente igual que la luz. El comportamiento cuántico de los objetos atómicos (electrones, protones, neutrones, fotones y demás) es el mismo para todos; todos son ‘partículas-ondas’ o como quiera que ustedes prefieran llamarlos.”

El modelo atómico de Rutherford

El siguiente paso fundamental en el desarrollo de la física cuántica tuvo lugar en 1911, de la mano de un físico de origen neozelandés que entonces dirigía el Laboratorio de Física de la Universidad de Manchester: Ernest Rutherford (1871-1937).

Rutherford también se dedicaba a investigar el fenómeno de la radiactividad, especialmente las radiaciones que emitían las sustancias radiactivas, que recibieron los nombres de “ α ”, “ β ” y “ γ ”, y que como se demostró consistían, respectivamente, en núcleos de helio, electrones y radiación electromagnética. En el curso de sus investigaciones en el dominio de la radiactividad, se familiarizó con las partículas α y β . Por consiguiente, no es de extrañar que pensase que podía utilizarlas como herramienta de análisis atómico. En 1909 dos investigadores de su laboratorio, Hans Geiger y Ernest Marsden, lanzaron partículas α contra placas delgadas de diversos metales. Para sorpresa de todos, encontraron que “la dirección de una pequeña fracción de las partículas α que llegan a una placa metálica se ve modificada de tal manera que vuelven a aparecer de nuevo en el lugar de partida”; es decir: rebotaban. Dos años más tarde, el propio Rutherford consiguió explicar semejante hecho introduciendo un modelo atómico, según el cual el átomo estaba formado por un núcleo central (una esfera de menos de 3×10^{-12} centímetros de radio), rodeado de “una esfera de electrificación”, de unos 10^{-8} centímetros de radio, con la misma cantidad de carga, pero signo opuesto, que el núcleo.

El modelo atómico de Rutherford era atractivo, pero tenía grandes inconvenientes. Si se pensaba en él como una especie de mini-sistema planetario gobernado por fuerzas electromagnéticas, entonces existía un problema obvio: los electrones que orbitaban en torno al núcleo estarían acelerados (su movimiento era circular), y por tanto deberían emitir radiación, lo que implicaba que perderían energía. Esto produciría que se fueran acercando al núcleo, sobre el que terminarían cayendo irremediabilmente. En otras palabras, este modelo atómico carecía de estabilidad.

De manera que se hacía preciso encontrar otro modelo que incorporase aquellos rasgos que habían servido a Rutherford para explicar la difusión con partículas α y β . La solución no tardó en llegar de la mano de un joven físico de Copenhague, Niels Bohr (1885-1962).

El modelo atómico de Bohr

Bohr, que pasó unos años con Rutherford en el Instituto de Física que éste dirigía en Manchester, se dio cuenta de que para construir un modelo atómico satisfactorio tenía que incluir de alguna manera el cuanto de energía de Planck-Einstein. En el artículo en el que en 1913 presentó sus ideas escribió: “Cualquiera que sea la modificación en las leyes del movimiento de los electrones, parece necesario introducir una cantidad ajena a la electrodinámica clásica; esto es, la constante de Planck $[h]$.”

Combinando la mecánica clásica con la electrostática, suponiendo que, en principio, las órbitas circulares del modelo de Rutherford eran estacionarias, esto es, que no emitían radiación, e introduciendo una expresión que cuantizaba (que permitía sólo ciertos valores, múltiplos de h) el momento angular de esas órbitas electrónicas, Bohr encontró que las órbitas no podían disminuir (ni aumentar) gradualmente su posición, sino que debían hacerlo de manera discontinua, *cuántica*. En este modelo atómico, cuando un electrón pasa de una órbita superior a otra inferior, emite energía bajo la forma de un cuanto de radiación, mientras que si absorbe energía (cuantos) un electrón “asciende” a un nivel superior. En otras palabras: saltos entre diferentes órbitas producen diferentes frecuencias (esto es, líneas espectrales). De hecho, uno de los principales logros del modelo atómico de Bohr fue su capacidad para justificar las relaciones matemáticas correspondientes a diferentes grupos de líneas espectrales (los espectros, con sus a veces miles de líneas, constituían hasta entonces un problema insuperable para cualquier teoría atómica), relaciones que habían sido descubiertas “jugando con números” por Johann Jacob Balmer y Johannes Robert Rydberg, y que la física anterior a Bohr se había mostrado incapaz de explicar. La espectroscopía se veía reducida a una consecuencia de la física cuántica.

Werner Heisenberg

Aunque el propósito de Bohr era proporcionar una teoría general de la constitución de todos los átomos y moléculas, en la práctica su formulación solamente explicaba el átomo de hidrógeno. Todos sus intentos de ir más allá fracasaron; ni siquiera pudo extender su teoría al espectro del helio, con sus dos electrones. Transcurriría una docena de años antes de que se encontrara esa teoría general (pero que no cumplía los requisitos que exigía la teoría especial de la relatividad formulada por Einstein en otro de sus artículos fundamentales que publicó en 1905). Entre todos los episodios de la historia de la ciencia en los que la gestación de una teoría aparece como un proceso largo y doloroso, el de la génesis de la teoría del movimiento de los objetos microscópicos, de la mecánica cuántica como se terminó denominando, destaca como el más trabajoso. Durante esa docena de años se sucedieron – con, para muchos, un alto durante los años de la Primera Guerra Mundial – descubrimientos experimentales de todo tipo y desarrollos teóricos no menos numerosos o chocantes. Experimentos como los de James Franck y Gustav Hertz y Otto Stern y Walter Gerlach, que demostraban, respectivamente, la existencia de los estados estacionarios postulados por Bohr y la cuantización espacial (no todas las direcciones eran posibles en los procesos cuánticos); la generalización de Arnold Sommerfeld del modelo atómico de Bohr, empleando recursos procedentes de la relatividad especial; la formulación del principio de correspondencia a cargo de Bohr; las fórmulas semiempíricas de Alfred Landé para explicar el efecto Zeeman anómalo; los multipletes descubiertos en Londres por Miguel Catalán y explicados introduciendo un nuevo número cuántico por Sommerfeld; el experimento de Arthur Holly Compton que ponía en evidencia la naturaleza corpuscular de la luz; la dualidad onda-corpúsculo de Louis de Broglie; la estadística desarrollada por Satyendra Nath Bose y Einstein; la teoría cuántica de la dispersión de Hendrik A. Kramers; o el principio de exclusión de Wolfgang Pauli. Estos avances culminaron en la formulación, en 1925, de una mecánica cuántica por un joven estudiante de 24 años de Sommerfeld: Werner Heisenberg (1901-1976).

Extraordinariamente dotado para un gran número de actividades, las intelectuales a la cabeza, Heisenberg seguramente pudo haber destacado en bastantes campos, pero fue la ciencia, y dentro de ella la física, la que finalmente atrajo su atención. Tras finalizar sus estudios de bachillerato y haber caído enfermo, recordó en su autobiografía (*Der Teil und das Ganze: Gespräche im Umkreis der Atomphysik*, 1969; publicado en castellano con el título de *Diálogos sobre la física atómica*), “tuve que guardar cama durante muchas semanas, y a lo largo de la convalecencia subsiguiente me encontré con mucho tiempo a solas con mis libros. En estos meses críticos cayó en mis manos una obra cuyo contenido me fascinó, aunque la comprendí sólo a medias. El matemático Hermann Weyl había realizado una exposición matemática de los principios de la teoría de la relatividad de Einstein bajo el título *Espacio-tiempo-materia* [1918]. La discusión de los difíciles

métodos matemáticos que en este libro se desarrollaban y el abstracto edificio conceptual de la teoría de la relatividad que había en su trasfondo, absorbió mi atención y provocó mi inquietud, robusteciendo con ello mi anterior decisión de estudiar matemáticas en la Universidad de Múnich.”

En la Universidad de Múnich, su ciudad natal, donde su padre era catedrático de Filología medieval y moderna, el joven Werner se aproximó al gran Ferdinand Lindemann, célebre por haber resuelto, en 1882, el problema de la cuadratura del círculo (lo que implicaba que π era un número trascendente), pero cuando éste se enteró de que había leído el *Espacio-tiempo-materia* de Weyl (él mismo entonces ya un célebre matemático) le rechazó con el argumento de: “Entonces usted ya está perdido para las matemáticas.”

La siguiente opción fue la física matemática, entonces (como con frecuencia ahora) no siempre distinguible de la física teórica, y estando en Múnich, “¿qué mejor elección que Arnold Sommerfeld, un “hombre bajo y corpulento”, recordaría Heisenberg, “con un bigote negro un tanto marcial, [que aunque] daba en principio una impresión dura, ya en las primeras palabras me pareció traslucir una bondad natural?”

Fue una magnífica elección. De entrada, Sommerfeld se esforzó por controlar las excesivas ansias filosóficas del brillante Werner. “A mí”, le declaró éste, “las cuestiones del trasfondo me interesan quizás aún más que las pequeñas tareas particulares.” Ante lo cual, el *herr professor* le contestó: “Usted sabe, sin embargo, lo que dijo Schiller aludiendo a Kant y a sus intérpretes: ‘Cuando los reyes edifican, tienen los carreteros trabajo’. ¡Todos somos primero carreteros! Pero usted verá que alegría le produce si hace tal trabajo cuidadosa y concienzudamente y si además, como esperamos, saca algo de él.”

Bajo la dirección de Sommerfeld, Heisenberg floreció científicamente y comenzó a investigar en algunos problemas de la física cuántica. Aun así, Sommerfeld decidió que sería conveniente para su educación que no se centrara exclusivamente en los problemas de la física cuántica y le asignó como tema para su tesis doctoral un problema de hidrodinámica clásica: la transición de un flujo laminar a turbulento. También aquí, Heisenberg mostró sus habilidades, desarrollando métodos de aproximación para manejar las ecuaciones no lineales implicadas. En 1923 completó su tesis, que apareció publicada al año siguiente, logrando así el título de doctor, aunque no sin dificultades; es famosa la historia de sus problemas en el examen oral (julio de 1923), que tenía como fin comprobar los conocimientos generales que el doctorando poseía sobre física: Wien, uno de los examinadores, preguntó a Werner acerca del poder de resolución de microscopios, telescopios e interferómetros de Fabry-Perot, cuestiones que no pudo contestar. Solo la ayuda de Sommerfeld le salvó del suspenso, en el que Wien insistía; pero únicamente logró la calificación más baja posible: *rite* (el orden era: *summa cum laude*, *magna cum laude*, *cum laude* y *rite*). Heisenberg no olvidaría aquella lección – y humillación –, teniendo

buen cuidado de aprender sobre el poder de resolución de instrumentos ópticos, conocimientos que le servirían bien en 1927, cuando los utilizó en el experimento mental con el que sustentó el principio de incertidumbre.

Antes, incluso, de haber defendido su tesis, Heisenberg se trasladó a Gotinga, como ayudante de Max Born, un personaje clave en la historia de la mecánica cuántica quien además, como veremos en otro capítulo, tuvo mucho que ver con María Goeppert Mayer, por lo que es adecuado detenerse en él.

Max Born

Max Born (1882-1970) nació en Breslau (hoy Wrocław, en Polonia) ciudad en donde su padre era catedrático de embriología en la universidad. En 1901, tras cursar el bachillerato, se matriculó en la universidad de su ciudad natal. Tras cursar tres semestres allí, y otros dos de verano en Heidelberg y Zúrich, en 1904 entró en la Universidad de Gotinga. Una de las grandes luminarias de allí por entonces era el matemático David Hilbert, con quien Max estableció relaciones muy pronto, encargándole aquel – lo que constituía un gran honor – que preparase las transcripciones de sus clases para que pudiesen ser consultadas por otros alumnos en la sala de lectura. En 1905, Born se convirtió en ayudante personal de Hilbert. De hecho, una de las características de la carrera científica de Born fue sus grandes dotes y conocimientos matemáticos, que, como veremos más adelante, fueron decisivos a la hora de dar una forma matemática acabada a la mecánica cuántica que Heisenberg propuso en 1925.

No obstante sus habilidades matemáticas, Born no se inclinó por esta disciplina, mostrando desde el principio interés por la física teórica, en concreto en temas como la teoría del electrón (lo que le llevó a ser uno de los primeros físicos en introducirse en el campo de la relatividad especial) o la teoría de la elasticidad. De hecho, la separación entre matemática y física teórica no estaba bien definida todavía: “En aquella época”, escribió en un breve escrito autobiográfico, “las Matemáticas abarcaban también la Física matemática. Por ejemplo, Hilbert y Minkowski dirigían un seminario sobre Electrodinámica de los cuerpos en movimiento, en el que se trataban problemas que hoy se incluyen bajo el nombre de Relatividad.”

Una vez doctor (defendió su tesis a finales de 1906), tuvo que realizar el servicio militar, del que fue licenciado en 1907. Decidió entonces irse a Inglaterra (llegó a Londres en abril), a Cambridge, para ampliar estudios con J. J. Thomson y Joseph Larmor: “Descubrí que la exposición del electromagnetismo hecha por Larmor apenas me enseñaba nada que no hubiera aprendido ya con Minkowski. Las demostraciones experimentales de J. J. Thomson eran, en cambio, brillantes y apasionantes.”

A los seis meses regresó a Breslau, pero pronto recibió una oferta de Hermann Minkowski, otro de los grandes matemáticos de Gotinga para que le ayudase con sus trabajos sobre la electrodinámica y teoría de la relatividad especial. Born aceptó: llegó a Gotinga en diciembre de 1908, pero desgraciadamente Minkowski falleció muy poco después, en enero de 1909, tras una operación de apendicitis. No por ello, sin embargo, se frustró su carrera en su *alma mater*. De hecho, su estatus como científico prosperó rápidamente, introduciéndose en los problemas de la física cuántica. Muestra del progreso de su carrera es que, en 1912, Abraham Michelson le invitó a dar una serie de conferencias sobre relatividad en Chicago, invitación que Born aceptó.

En 1914, justo al iniciarse la Primera Guerra Mundial, fue llamado a Berlín, como profesor extraordinario (extra-ordinario), el puesto previo a catedrático – para ayudar a Planck en sus obligaciones docentes, tareas a las que se incorporó en la primavera de 1915. Allí, además de servir a su país, Born intimó con Einstein. Recurriendo de nuevo a sus notas autobiográficas: “En los aciagos días de la guerra, cuando resultaba difícil conseguir alimento suficiente para la familia, la amistad con Einstein constituyó un gran consuelo. Nos veíamos a menudo, tocábamos juntos sonatas para violín y discutíamos no sólo cuestiones científicas, sino también la situación política y militar [...] Desaprobábamos abiertamente las metas políticas del Gobierno alemán y estábamos convencidos de que habrían de conducir a una catástrofe. En este año [diciembre de 1915] completó Einstein su teoría de la relatividad general y la discutí conmigo. Quedé tan impresionado de la grandeza de su concepción que decidí no trabajar jamás en este campo [...] Juntos vivimos la derrota militar, la Revolución en Berlín y la fundación de la República Alemana. Como estaba regida desde Weimar y no desde Potsdam, abrigamos la esperanza de un futuro pacífico.”

En 1919, y como Max von Laue estaba muy interesado en vivir en Berlín, permutaron sus respectivos puestos, lo que significó que Born se trasladó a Fráncfort, donde Laue era catedrático de Física Teórica, categoría que Born conservó. Allí tuvo un pequeño laboratorio a su disposición, en el que su ayudante, Otto Stern, realizó en 1922, junto a Walther Gerlach, experimentos que demostraron que la orientación espacial del momento angular de los átomos estaba cuantificada; esto es, que no variaba de forma continua (efecto Stern-Gerlach). Pero cuando Stern y Gerlach realizaron ese experimento Born ya no estaba en Fráncfort: en 1921, la Universidad de Gotinga le ofreció suceder a Peter Debye como catedrático y director del Instituto de Física, que englobaba tanto física teórica como experimental. Sin embargo, Born no estaba interesado en ocuparse de la parte experimental, y convenció al ministerio de que nombrase también catedrático a James Franck (1882-1964), para la sección experimental. La propuesta fue aceptada y así Gotinga contó a partir de entonces con tres catedráticos de Física: Robert Pohl, que había pasado de profesor extraordinario a ordinario en 1920, Born y Franck.

Como veremos en otro capítulo, Franck también desempeñó un papel destacado en la vida de María Goeppert Mayer.

En Göttinga, Born se centró fundamentalmente en los problemas de la física cuántica, tarea en la que le ayudaron considerablemente sus dos primeros ayudantes: Wolfgang Pauli y Werner Heisenberg. Veamos cómo se refería a ellos en su biografía más completa, *My Life*:

“La serie de los ayudantes [que tuve en Göttinga] fue bastante notable; a saber: Pauli, Heisenberg, Jordan, Hund, Hückel, Nordheim, Heitler y Rosenfeld [...].

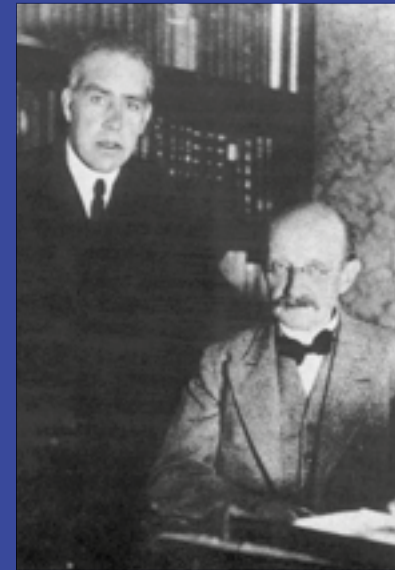
Pauli me fue recomendado por Sommerfeld [...] Era un ‘niño prodigio’[...] Nos encontramos por primera vez durante el verano de 1921, en Ehrwald, Tirol, estando yo de vacaciones [...] Recuerdo que incluso en la escenografía montañosa más majestuosa, Pauli continuaba discutiendo problemas de física. No era posible ningún tipo de relajamiento mental en su compañía. Por supuesto, no fue un auténtico éxito como ‘ayudante’. Trabajamos juntos, en refinados problemas de la teoría de perturbaciones y su aplicación a la teoría cuántica de los átomos, y aprendí mucho de él, ciertamente más que él de mí. Pero apenas me ayudó en mi trabajo rutinario de enseñanza. Yo sufría entonces de ataques de asma y algunas veces tenía que permanecer en cama durante un día o dos. Se suponía entonces que Pauli debía dar mi clase, que era de 11 a 12 del mediodía. Pero a menudo lo olvidaba y si enviaba a nuestra criada para que se lo recordase a las diez y media, normalmente le encontraba todavía durmiendo.”

Cuando Pauli se marchó, Sommerfeld le recomendó a Heisenberg. “No era menos “niño prodigio”. Estaba entonces trabajando en su tesis doctoral [...] pero] Sommerfeld le aconsejó que aceptase mi oferta para que respirase una atmósfera científica diferente. Cuando llegó (debió ser en octubre de 1922) parecía un sencillo muchacho campesino, con pelo corto y rubio, ojos claros y brillantes, y una expresión encantadora. Tomó sus deberes como ayudante mucho más seriamente que Pauli, y me fue de gran ayuda. Su increíble rapidez de comprensión y agudeza le permitía llevar a cabo una cantidad colosal de trabajo sin demasiado esfuerzo; completó su tesis sobre hidrodinámica, trabajó en problemas atómicos, en parte sólo y en parte en colaboración conmigo, y me ayudó a dirigir a mis estudiantes de investigación.”

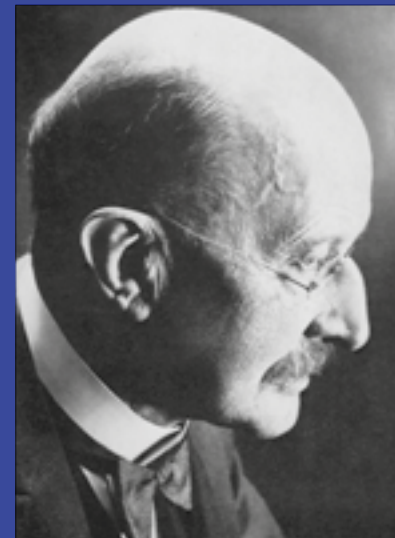
Pero regresemos a Heisenberg antes de que se trasladase a Göttinga.

Heisenberg, Born, Bohr y la mecánica cuántica matricial

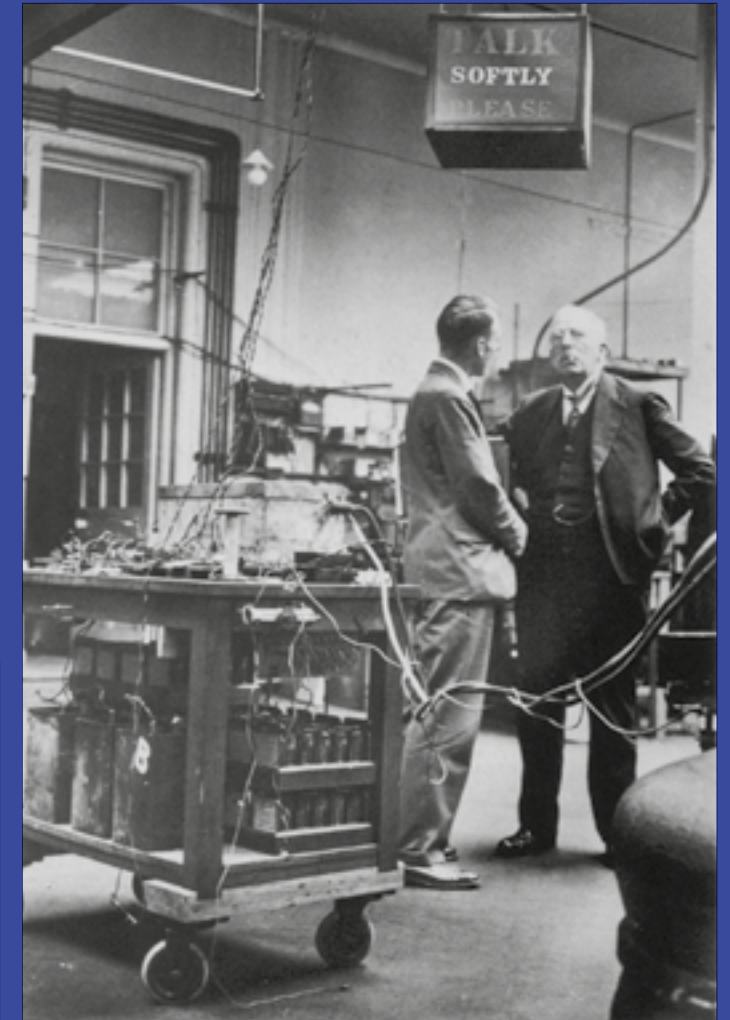
Aunque, como vimos, Sommerfeld impuso a Heisenberg realizar su tesis doctoral sobre hidrodinámica, no dejaba de tenerle al tanto de lo que sucedía en la física cuántica. Y un día, al comienzo del verano de 1922, Sommerfeld le preguntó, según contó Heisenberg en sus memorias, “de modo casi espontáneo tras un



Niels Bohr y Max Planck



Max Planck



Ernest Rutherford en el laboratorio Cavendish



Niels Bohr en Göttinga (junio de 1922). De izquierda a derecha: C. Oseen, N. Bohr, J. Franck y O. Klein (de pie), M. Born, sentado

coloquio largo sobre la teoría atómica de Bohr: ‘¿Le gustaría a usted conocer a Niels Bohr personalmente? Bohr va a pronunciar próximamente en Göttingen una serie de conferencias sobre su teoría. Estoy invitado a ellas, y podría llevarle a usted conmigo.’” Aceptó, naturalmente (Sommerfeld cubrió los gastos de su pupilo). Las conferencias, el *Bohr-Festspiele* (Festival Bohr), tuvieron lugar entre el 12 y 22 de junio, con la asistencia de, entre otros, Paul Ehrenfest, Alfred Landé y Wolfgang Pauli, además de los físicos de Göttingen. Estaban financiadas con los intereses del fondo – cien mil marcos – que había dejado en 1906 el matemático Paul Wolfskehl para quien demostrase el teorema de Fermat. Y, continuaba su narración:

“La imagen de la primera conferencia [de Bohr] se ha mantenido imborrable en mi memoria. El auditorio estaba repleto a rebosar. El físico danés, que ya por su estatura era reconocido como escandinavo, se hallaba con la cabeza ligeramente inclinada, sonriendo amistosamente y casi algo tímidamente, sobre la cátedra, inundada por toda la luz del verano gotingués, que entraba por las ventanas totalmente abiertas. Bohr hablaba con voz relativamente baja, con suave acento danés, y cuando explicaba las hipótesis particulares de su teoría, escogía las palabras cuidadosamente, con una meticulosidad mayor a la que estábamos acostumbrados con Sommerfeld, y casi tras cada una de las proposiciones, formuladas con esmero, se entreveían largas series de ideas, de las que solo era expresado el comienzo y cuyo fin se perdía en el claroscuro de una posición filosófica muy incitante para mí.”

En un momento determinado, después de que Bohr se refiriese a un trabajo de Kramers que Heisenberg conocía, este objetó:

“Yo me levanté y propuse las objeciones que habían brotado en nuestros diálogos de Múnich y me hacían dudar de los resultados de Kramers. Bohr notó enseguida que los reparos se apoyaban en una dedicación cuidadosa a su teoría.

Respondió vacilante, como si la objeción lo hubiera inquietado, y, al concluir la discusión, se acercó a mí y me preguntó si podríamos dar juntos, después de comer, un paseo por el Hainberg, a fin de discutir a fondo los problemas planteados por mí.

Este paseo ejerció el más fuerte influjo sobre mi evolución científica ulterior, o tal vez sea más exacto decir que mi evolución científica propia comenzó con este paseo.”

Y después de detallar los asuntos científicos – y algunos personales –, Heisenberg concluía el recuerdo de su primer contacto con Bohr con las siguientes palabras:

“Cuando nos acercábamos a las primeras casas de la ciudad, el diálogo se orientó hacia los físicos y matemáticos de Göttingen: Max Born, James Franck, Richard Courant y David Hilbert, que yo acababa de conocer en aquellos días, y hablamos brevemente sobre la posibilidad de que pudiera cursar también una

parte de mis estudios en Göttingen. De este modo, el futuro se me presentaba lleno de ilusiones y posibilidades nuevas, que yo me pintaba con luminosos colores, de vuelta a mi pensión, tras haber acompañado a Bohr a su casa.”

Heisenberg y Bohr mantuvieron una estrecha relación, hasta que la Segunda Guerra Mundial los separó profundamente: Dinamarca fue uno de los países invadidos por Alemania, y en septiembre de 1941 Heisenberg viajó a Copenhague como una especie de “embajador cultural” alemán para dar unas conferencias allí, que aprovechó para visitar a Bohr, visita que puso en evidencia cuán diferentes eran sus posturas políticas. Pero antes de que se estableciese realmente la relación entre ambos, Heisenberg, siguiendo el consejo de Sommerfeld, como ya vimos, se trasladó a Göttingen.

En Göttingen, la física cuántica ocupaba un lugar central en las investigaciones de Born y Franck. Y Heisenberg se benefició de ello: “En los seminarios que bajo la dirección de Max Born tuvieron lugar en Göttingen, en el semestre de verano de 1924”, recordó en su autobiografía, “se hablaba ya [...] de una nueva mecánica cuántica, que más tarde debería ocupar el lugar de la antigua mecánica newtoniana y de la que, por el momento, sólo en puntos particulares aislados se podían conocer los contornos. También en el semestre de invierno que le siguió, durante el cual trabajé de nuevo a temporadas en Copenhague y me esforzaba por estructurar una teoría que había desarrollado [Hendrik] Kramers [colaborador de Bohr] de los llamados fenómenos de dispersión, se concentraron nuestros esfuerzos no en deducir las relaciones matemáticas exactas, sino en averiguarlas partiendo de la similitud con las fórmulas de la física clásica”.

En la cita anterior, Heisenberg mencionaba que pasó algún tiempo en Copenhague, con Bohr. Llegó a la capital danesa el 15 de marzo de 1924, en lo que constituiría su primera visita. Aquella primera estancia en Copenhague no fue muy larga – unas dos semanas –, aunque sí intensa, siendo cuidadosamente atendido por su anfitrión: la fama del discípulo de Sommerfeld y entonces colaborador de Born le había precedido. Pronto regresaría para una estancia más amplia: a principios de julio, Bohr le escribía informándole que la *International Education Board* de la Fundación Rockefeller le había concedido mil dólares para que trabajase en Copenhague durante un año. Sin embargo, el joven Werner constituía un bien científico muy apreciado y Born no estaba dispuesto a renunciar a él; en consecuencia, Bohr y Born llegaron a un acuerdo: como Born iba a pasar el semestre de invierno de 1924-25 en Estados Unidos, Werner podía pasar ese período en Dinamarca, pero debía estar de regreso en Göttingen el 1 de mayo de 1925. De esta manera, Heisenberg se situaba en una posición especialmente favorable, ya que podía beneficiarse de, y combinar dos tradiciones, dos estilos científicos, diferentes pero complementarios. “El énfasis en Göttingen estaba más en el lado matemático, en el lado formal”, señaló Heisenberg en la entrevista que mantuvo con Thomas Kuhn en febrero de 1963 durante el Proyecto *Sources for History of*

Quantum Physics, “mientras que en Copenhague estaba más en el lado, yo diría, filosófico. Esto era cierto en el siguiente sentido: para Born, una descripción de física debería ser siempre una descripción matemática, de manera que su atención estaba concentrada en la idea de cómo el esquema matemático describiría esas curiosas cosas que vemos en nuestros experimentos. La aproximación de Bohr en Copenhague era diferente. Bohr diría: ‘Bien, ¿cómo puede evitar la naturaleza las contradicciones? Ahora tenemos la imagen ondulatoria, conocemos la interferencia, sabemos del efecto Compton, sabemos todo esto, pero ¿cómo puede poner el Señor orden en todo esto?’ Y así, lo primero que quería era comprender cómo se podían evitar las contradicciones, y diría: ‘Solamente cuando hayamos comprendido esto suficientemente, podremos esperar ponerlo en forma matemática’.”

Fue semejante “doble enfoque”, filosófico-matemático, el que le ayudó a producir una mecánica cuántica, en la que coexistieron la forma matemática (el álgebra no conmutativa de matrices) y el enfoque filosófico (basar la teoría sólo en magnitudes observables).

Veamos cómo explicó Heisenberg los pasos que le llevaron al umbral de la nueva mecánica cuántica: “En el semestre de invierno de 1924/25 había vuelto a trabajar en Copenhague y, junto a Kramers, a seguir desarrollando la teoría de la dispersión [de ondas y partículas]. En relación con esto habían aparecido en las fórmulas del efecto Raman ciertas expresiones matemáticas que en la teoría clásica eran productos de la serie de Fourier, mientras que en la teoría cuántica había que sustituirlas evidentemente por análogos productos de series que tenían que ver con las amplitudes teórico-cuánticas de las líneas de emisión y absorción [...] Tras regresar a Göttingen en el semestre de verano de 1925, una de las primeras discusiones con Born nos llevó a la conclusión de que yo debería intentar adivinar las amplitudes e intensidades correctas del hidrógeno a partir de las correspondientes fórmulas (según el principio de correspondencia) de la teoría clásica [...] Pero al profundizar resultó que el problema era demasiado complicado, al menos para mis habilidades matemáticas, por lo cual busqué sistemas mecánicos más sencillos en los que dicho método prometiese más éxito. Al mismo tiempo, tenía la sensación de que debía renunciar a cualquier descripción de las órbitas electrónicas; de que incluso debía reprimir conscientemente tal idea. Quería fiarlo todo a las reglas semiempíricas para la multiplicación de series de amplitudes, cuya validez se había probado en las teorías de la dispersión.”

A finales de mayo y en la isla de Helgoland, a la que se había trasladado para evitar la fiebre de heno que padecía, Heisenberg pudo aplicarse más a fondo en sus investigaciones. Estudiando uno de esos sistemas sencillos que buscaba, el oscilador no armónico unidimensional, sustituyó la coordenada posición por una tabla de amplitudes que correspondía a una serie de Fourier clásica, y llegó a la ecuación de movimiento del sistema; en otras palabras, había desarrollado un cálculo para las amplitudes de transición de las líneas de emisión y absorción en

los átomos. Le sorprendió encontrar que en las multiplicaciones de amplitudes que debía realizar $A \cdot B$ no fuese igual a $B \cdot A$; sólo tiempo después se enteró por Max Born que lo que había estado haciendo era, sin saberlo, manejando y multiplicando matrices, que no son sino conjuntos ordenados de números: las diferentes amplitudes de transición entre niveles. (En la actualidad, el cálculo matricial constituye un apartado básico, y poco complicado, de la matemática, y como tal se enseña en cursos más bien preliminares, con lo que el conocimiento de las matrices y sus propiedades – álgebra – se encuentra muy extendido, no limitándose a matemáticos. Pero en la época de la que estamos hablando esto no era todavía así, y por tanto no debemos extrañarnos de que Heisenberg no conociera su existencia, y sí el bien formado matemáticamente Born.)

Naturalmente, hubo que probar que cumplía con más requisitos para ver si el formalismo que había desarrollado podía aspirar a ser una mecánica cuántica, pero al final todos se verificaban. Para Heisenberg, “cabía la esperanza de haber encontrado la base de una mecánica cuántica”.

Tras permanecer dos semanas en Helgoland, Heisenberg regresó a Göttingen, aunque deteniéndose en Hamburgo para visitar a Wolfgang Pauli, cuya opinión y poderes críticos tanto valoraba. Y la reacción de su amigo fue muy positiva. A Kramers, por ejemplo, Pauli le escribía el 27 de julio:

“La ‘comunidad de auténticos creyentes’ no ganaría ni honor ni mucho éxito intentando combatir la tendencia del actual desarrollo de la teoría cuántica que pretende analizar los conceptos de movimiento y fuerza. Me parece que también existe la esperanza de realizar avances *positivos* en esta dirección. En particular, he recibido con alegría las atrevidas suposiciones de Heisenberg (de las que usted habrá oído sin duda en Göttingen). Ciertamente, se está aún muy lejos de ser capaz de decir algo definitivo, y aquí estamos únicamente en los principios. Pero lo que me ha gustado tanto de las consideraciones de Heisenberg es el *método* de su procedimiento y el *propósito* que le ha llevado a hacer estas consideraciones. En general, creo que en lo que se refiere a mis ideas científicas ahora estoy muy próximo a Heisenberg y que tenemos la misma opinión en casi todo, en la medida en que esto es posible en dos personas independientes. También he advertido con placer que Heisenberg ha aprendido un poco de pensamiento filosófico con Bohr en Copenhague y se ha apartado perceptiblemente de lo puramente formal. En consecuencia, ahora me siento menos solo que hace medio año cuando (espiritual y espacialmente) me encontraba bastante aislado entre la Escuela de la escuela mística de los números de Múnich y la Caribdis del reaccionario golpe [*Putsches*] de Copenhague, ¡del que usted ha hecho propaganda con excesos fanáticos! Ahora, mi única esperanza es que usted no retrase más el proceso de recuperación de la física de Copenhague, algo que, como resultado del fuerte sentido de la realidad de Bohr, no puede dejar de tener lugar.”

Ciertamente, ser agradable y cortés no formaba parte de las características personales que adornaban a Pauli.

Un punto especialmente interesante en la carta de Pauli es la referencia que hacía a que, influido por Bohr, Heisenberg se había hecho más “filosófico”, y que ello le había beneficiado. La interpretación más inmediata y segura de esta manifestación tiene que ver con que el sistema cuántico que había desarrollado Heisenberg se basaba en “magnitudes observables”.

Cuando Born leyó en Göttinga el manuscrito que preparó Heisenberg quedó “fascinado”. El artículo fue, por consiguiente, enviado para su publicación: “Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen” (“Reinterpretación teórico-cuántica de relaciones cinemáticas y mecánicas”), *Zeitschrift für Physik* 33, 879-893 (1925).

La mecánica cuántica matricial contenida en aquel primer artículo estaba todavía por desarrollar y formalizar. Tal tarea, en la que las habilidades matemáticas de Born, formado con David Hilbert y Felix Klein, fueron de gran ayuda, las realizó Heisenberg en colaboración con el propio Born y Pascual Jordan (1902-1980). El principal resultado de aquella colaboración fue un artículo denominado posteriormente el de los “tres hombres” (*Drei-Männer Arbeit*), en el que la mecánica matricial tomó su forma más acabada: Max Born, Werner Heisenberg y Pascual Jordan, *Zur Quantenmechanik II*, *Zeitschrift für Physik* 35, 557-615 (1925).

La nueva mecánica matricial fue recibida de forma muy diferente formándose dos grupos. Por un lado, estaban los, digamos, “modernos”, netamente cuánticos, encabezados por hombres como Born, Bohr y Pauli, que la aceptaban, y por otro, los “antiguos”, o, tal vez mejor, los “clásicos”, que la rechazaban.

En lo que se refiere a los primeros, aparte de ellos mismos, contaban además con el apoyo de su actividad y conexiones. El ejemplo de Born es representativo: entre el 14 de noviembre de 1925 y el 22 de enero de 1926 dictó un curso en el Massachusetts Institute of Technology, que tituló “Problemas de la dinámica atómica”, en el que se ocupó de explicar con detalle tanto los contenidos del artículo de Heisenberg de 1925, como el suyo con Jordan, el *Drei-Männer Arbeit* (aún no finalizado completamente) y el de Pauli en el que aplicaba la mecánica de Heisenberg al átomo de hidrógeno. Y no fue sólo en Massachusetts donde disertó Born: también visitó el California Institute of Technology, la Universidad de California en Berkeley y las Universidades de Wisconsin, Chicago y Columbia (Nueva York).

Pasando ahora a los físicos “cuánticos-clásicos”, y aunque no podían dejar de interesarse en las nuevas ideas, como Einstein reconocía en una carta que escribió el 7 de marzo de 1926 a Hedwig Born, esposa de Max Born: “Las ideas de Heisenberg y Born nos tienen en vilo a todos aquellos que se interesan por las teorías. Una tensión única ha sustituido entre nosotros, hombres de sangre espesa, a la sombría resignación”, la altamente matemática y abstracta formulación de

Heisenberg-Born-Jordan (recordemos que la imagen física de órbitas no figuraba entre los constructos de la teoría) no suscitó demasiadas simpatías entre ellos, especialmente entre los físicos de Berlín que, con “admiración y desconfianza a la vez, observaba[n] el desarrollo de la mecánica cuántica” (Einstein a Ehrenfest, 28 de agosto de 1926). Esta postura de los “caballeros del continuo”, como Heisenberg los llamaba con cierta picardía en sus cartas a Pauli, se debía al carácter excesivamente abstracto de la teoría, que se había formulado prescindiendo de cualquier tipo de modelo para la descripción de los procesos atómicos. A Einstein (carta a Michele Besso, 25 de diciembre de 1925), el representante más prominente de los físicos de la capital alemana, el formalismo matricial de Heisenberg le parecía un “alfabeto mágico muy ingenioso, protegido por su complejidad contra cualquier intento de falsación”. Más repelente aún les parecía a estos físicos la forma en la que el británico Paul Dirac (1902-1984), que desarrolló su propia versión de la teoría cuántica, solía presentar sus resultados. Einstein (carta a Paul Ehrenfest, 23 de agosto de 1926) la comparaba con “un balanceo sobre un sendero vertiginoso entre ingenio y locura; nada de lo cual puede cogerse con las manos”. De tono parecido eran los juicios emitidos por Max von Laue (carta a Erwin Schrödinger, 12 de octubre de 1926) cuando se quejaba del “monstruoso tratamiento” que Pauli había dado al problema del átomo de hidrógeno utilizando el método matricial de Heisenberg.

El propio Heisenberg tuvo oportunidad de comprobar la reacción de Einstein a su planteamiento básico. En la primavera de 1926, Heisenberg fue invitado a hablar en el coloquio que organizaban los físicos de Berlín para exponer su teoría cuántica. Tras su intervención, Einstein le pidió que le acompañase a su casa para continuar discutiendo el tema de la nueva mecánica cuántica: “Llegados a nuestro destino”, recordó Heisenberg muchos años después, “acometió inmediatamente una cuestión central, la del fundamento filosófico de la nueva mecánica cuántica. Me hizo notar que en mi descripción matemática no aparecía para nada el concepto de ‘órbita de un electrón’, mientras que en una cámara de niebla sí podía uno observar directamente su trayectoria. Se le antojaba absurdo afirmar que la trayectoria del electrón existía en esa cámara de niebla, pero no en el interior del átomo. El concepto de trayectoria no podía depender del tamaño del espacio en el que tuvieran lugar los movimientos del electrón. Yo me defendí justificando con detalle la necesidad de abandonar el concepto de órbita para el interior del átomo. Señalé que esa órbita no se podía observar, que lo que realmente uno registraba eran frecuencias de la luz emitida por el átomo, intensidades y probabilidades de transición, pero no órbitas. Y que, como lo lógico era introducir en una teoría sólo magnitudes directamente observables, el concepto de órbita electrónica no debía aparecer en la teoría. Einstein, para mi sorpresa, no se dio por satisfecho con esta justificación. Opinaba que cualquier teoría entraña magnitudes inobservables y que el principio de utilizar sólo magnitudes observables no era posible llevarlo consecuentemente a la práctica. Cuando repliqué que me había limitado a

emplear la clase de filosofía en la que él había basado su teoría de la relatividad, repuso: ‘Puede que en algún momento yo haya utilizado esa filosofía y que incluso haya escrito sobre ella, pero no deja de ser un absurdo’.”

Ante los sentimientos de repulsa y frustración que los trabajos de los físicos “matriciales”, de Heisenberg y Pauli, especialmente, suscitaron entre los famosos físicos berlineses, se puede comprender el alivio que éstos y otros experimentaron cuando Schrödinger presentaba, menos de medio año después del descubrimiento del formalismo matricial, una mecánica ondulatoria que prometía un retorno a la más familiar física del campo, entendiendo por tal “la esencia de todas aquellas teorías que describen los fenómenos físicos en forma causal mediante ecuaciones en derivadas parciales en el espacio y en el tiempo”.

Schrödinger y la mecánica ondulatoria

El 29 de noviembre de 1924, el físico francés Louis de Broglie (1892-1987) presentaba su tesis doctoral, titulada *Recherches sur la théorie des quanta (Investigaciones sobre la teoría de los cuantos)* en la Facultad de Ciencias de la Universidad de París. En ella se introducía la famosa dualidad onda-corpúsculo que ya había atisbado Einstein en 1909. En palabras del propio De Broglie en una presentación que escribió para la reedición de su tesis publicada en 1963: “Guiado por la idea de una relación general entre las nociones de frecuencia y de energía, admitimos en el presente trabajo la existencia de un fenómeno periódico de una naturaleza todavía por precisar que estaría ligado a todo agrupamiento aislado de energía”. Esta suposición significaba que a cada partícula (como el electrón) se le podía asociar una onda física, ψ , que se propaga en el espacio. Las condiciones de cuantización de Bohr-Sommerfeld aparecían ahora como afirmaciones sobre el número de longitudes de onda que cubren de manera exacta la órbita de un electrón alrededor del núcleo.

Una manera de entender el resultado de De Broglie era considerar que había obtenido la mecánica ondulatoria (en tanto que asociaba ondas al movimiento de partículas) de electrones libres, de electrones que no interaccionaban. Se podía pensar que siguiendo por el camino que había abierto, se llegaría a obtener una mecánica cuántica, de nuevo ondulatoria, general. Entre los que creyeron en el enfoque del físico francés se encontraba Erwin Schrödinger (1887-1961), un austriaco que ocupaba una cátedra en Zúrich desde 1921.

En una serie memorable de artículos publicados en 1926, Schrödinger desarrolló tal mecánica cuántica ondulatoria: “Quantisierung als Eigenwertproblem” (“Cuantización como un problema de valores propios”). Un rasgo que distinguía de entrada a su mecánica de la de Heisenberg era su significado físico: al contrario que la mecánica matricial, la ondulatoria se podía *visualizar*. Y en cuanto a aparato matemático, lejos del entonces poco conocido cálculo matricial, las ecuaciones de

Schrödinger eran las familiares ecuaciones en derivadas parciales, que tan bien recogía el recién publicado (1924) libro de Richard Courant y David Hilbert, *Methoden der mathematischen Physik (Métodos de física matemática)*. De hecho, en el artículo en el que Schrödinger estableció la relación de su teoría con la de Heisenberg él mismo se refería a las ventajas matemáticas de su método:

“Mi teoría fue inspirada por L. de Broglie, *Ann. De Physique* (10), 3, p. 22 1925 (*Theses*, París, 1924), y por breves, aunque infinitamente perspicaces, comentarios de A. Einstein, *Berl. Ber.*, 1925, p. 9 *et seq.* Al principio yo no sospechaba en absoluto que existiese alguna relación con la teoría de Heisenberg. Naturalmente, sabía de su teoría, pero me desanimaba, si no repelía, lo que me parecían métodos muy difíciles de álgebra trascendental, y su carencia de sentido intuitivo [*Anschaulichkeit*].”

La idea física que subyacía inicialmente en los trabajos de Schrödinger fue resumida adecuadamente por el respetado físico holandés Hendrik A. Lorentz en una carta que dirigió a su colega austriaco el 27 de mayo de 1926:

“Su conjetura de que la transformación que tendrá que experimentar nuestra dinámica será similar a la transición de la óptica de rayos a la óptica ondulatoria suena muy tentadora, pero tengo algunas dudas acerca de ella.

Si le he entendido correctamente, entonces una ‘partícula’, un electrón por ejemplo, sería comparable a un paquete de ondas que se mueve con la velocidad de grupo.”

Aquellos a los que repugnaba renunciar a la máxima clásica *natura non facit saltus*, los “caballeros del continuo” mencionados anteriormente, recibieron con entusiasmo las contribuciones e ideas de Schrödinger. Einstein (carta a Schrödinger, 26 de abril de 1926) estaba convencido de que Schrödinger había “realizado un avance decisivo con su formulación de la condición cuántica, de la misma manera que estoy convencido de que el camino abierto por Heisenberg-Born es erróneo”; Planck (carta a Schrödinger, 2 de abril de 1926) leyó sus artículos de 1926 “igual que un niño curioso escucha en suspense la solución de un rompecabezas que le ha preocupado durante mucho tiempo, y también estoy encantado con las bellezas que son evidentes a la vista”; y Lorentz (carta a Schrödinger, 27 de mayo de 1926) señalaba que si “tuviese que escoger ahora entre su mecánica ondulatoria y la mecánica matricial, daría preferencia a la primera, debido a su mayor claridad intuitiva”. Sin embargo, pronto se descubrió que la interpretación inicial de Schrödinger no se podía mantener. Uno de los problemas, señalado por Lorentz, era la dispersión de los paquetes de ondas, que hacía casi imposible sostener la interpretación de las partículas – electrones – como ondas en un sistema de más de una partícula. Los problemas con la interpretación física de la mecánica ondulatoria de Schrödinger no significaban, sin embargo, que el formalismo de la teoría fuese incorrecto, sólo únicamente que había que descartar esa interpretación particular. Esto fue confirmado por el descubrimiento, debido al propio Schrödinger,

de la “identidad matemática, formal” de la mecánica ondulatoria, la mecánica que resaltaba lo continuo, y la mecánica matricial, que destacaba lo discontinuo.

Al principio, los partidarios de la mecánica matricial no recibieron con agrado la idea de que la mecánica ondulatoria representaba, en el fondo, la misma realidad física que la matricial. Heisenberg, en particular, fue muy reacio a aceptar la nueva formulación. Sin embargo, la teoría de Schrödinger terminaría imponiéndose con bastante rapidez, debido a ser mucho más fácilmente manejable. Y los antiguos defensores del esquema alternativo terminarían, no sólo pasándose al bando contrario, sino también contribuyendo a configurar su interpretación física, una interpretación que sería muy diferente a la que Schrödinger y los caballeros del continuo habrían deseado. La interpretación probabilista realizada en 1926 por Max Born de la función de onda, ψ (el objeto que describía los sistemas cuánticos), definida en el campo de los números complejos, consideraba a $|\psi|^2$ como una medida de la densidad de probabilidad de que el sistema se encontrase en el estado representado por ψ .

El principio de incertidumbre

Un elemento extremadamente importante de la mecánica cuántica que terminó construyéndose fue el famoso “principio de incertidumbre” que Heisenberg formuló en 1927. Veamos cómo llegó a él.

A comienzos de mayo de 1926 Heisenberg se instaló en Copenhague como “lector” en la universidad y ayudante de Bohr, con un permiso temporal de Göttinga, ya que no quería romper relaciones con Alemania; de hecho, estaba esperando una buena oferta de una cátedra allí (permaneció en Copenhague hasta junio de 1927).

En Copenhague, y más aún después de las discusiones que habían tenido con Schrödinger durante su estancia, Bohr y Heisenberg continuaron debatiendo intensamente sobre cómo interpretar aspectos básicos de la nueva física cuántica. En su autobiografía Heisenberg se refirió a aquellas conversaciones:

“En los meses siguientes, la interpretación física de la mecánica cuántica constituyó el tema central de los coloquios que mantuvimos Bohr y yo. Mi habitación estaba situada entonces en el piso más alto del edificio del instituto, en un pequeño ático bellamente decorado, con paredes inclinadas, desde el que se podía divisar la arboleda que hay en la entrada del parque Fælled. Bohr venía con frecuencia a mi cuarto, ya muy entrada la noche, y discutíamos todos los experimentos mentales posibles para ver si en realidad habíamos entendido de manera completa la teoría. Pronto se vio que Bohr y yo buscábamos la solución a las dificultades en direcciones algo distintas. Bohr pretendía yuxtaponer equiparadas las dos representaciones intuitivas, la imagen de partículas y la imagen de ondas, con lo que intentaba formular que estas representaciones se excluyen, sí, recíprocamente, pero que ambas juntas y sólo juntas hacían posible una descrip-

ción completa del acontecer atómico. No me agradaba, lo confieso, esta manera de pensar. Yo quería partir del hecho de que la mecánica cuántica, en su forma entonces conocida, imponía, sin duda, una interpretación física determinante para algunas magnitudes que en ella aparecían – por ejemplo, para los valores medios de la energía, el momento eléctrico, el impulso, para los valores medios de las variaciones, etc. –, y que, por tanto, era totalmente probable que no había ya margen de libertad respecto a la interpretación física. Más bien se debía llegar a la interpretación general correcta por medio de una limpia conclusión lógica a partir de la interpretación más especial ya existente. Por esto me molestó bastante – es verdad que sin razón – un trabajo, sobresaliente de suyo, de Born, en Göttinga, en el que había tratado los procesos de colisiones según los métodos de Schrödinger, y había propuesto la hipótesis de que el cuadrado de la función de onda de Schrödinger es una medida de la probabilidad de hallar un electrón en la posición determinada. La tesis de Born me parecía absolutamente exacta, pero me desagradaba, porque parecía envolver un cierto margen de libertad en la interpretación.”

Entre los experimentos posibles que Bohr y Heisenberg consideraron, uno les planteaba serios problemas: el que, como señalé anteriormente, Einstein había formulado a Heisenberg referente a la trayectoria de un electrón a través de una cámara de niebla. (Una cámara de niebla explota el fenómeno de la formación, por condensación, de gotas de agua alrededor de los iones de un gas; de esta forma, es posible observar y fotografiar las trayectorias de las partículas ionizantes.) Recurriendo de nuevo a las memorias de Heisenberg: “A pesar de todo, ninguno de los dos podíamos comprender cómo un fenómeno tan sencillo como la trayectoria de un electrón a través de la cámara de niebla pudiera armonizarse con el formalismo matemático de la mecánica cuántica o de la mecánica ondulatoria. En la mecánica cuántica no aparecía en modo alguno el concepto de trayectoria, y en la mecánica ondulatoria podía darse, ciertamente, un rayo material estrictamente dirigido; pero este rayo debía extenderse poco a poco sobre ámbitos espaciales que eran muy superiores al diámetro de un electrón. La situación experimental ofrecía, sin duda, un cariz muy diferente”.

La intensidad de los intercambios entre ambos alcanzó tal grado que, agotado, Bohr decidió en febrero de 1927 viajar a Noruega para descansar y esquiar. Esto resultó ser afortunado para Heisenberg, que ya pudo pensar a solas. Y, en sus propias palabras:

“Concentré entonces mis esfuerzos totalmente en la cuestión de cómo puede representarse matemáticamente en la mecánica cuántica la trayectoria de un electrón en la cámara de niebla. Cuando una de las primeras tardes tropecé en mi análisis con dificultades insuperables, comprendí con claridad meridiana que posiblemente habíamos planteado la cuestión de manera equivocada. Pero, ¿qué podría haber de equivocado en el planteamiento? La trayectoria del electrón en

la cámara de niebla era un hecho, ya que se la podía observar. El esquema matemático de la mecánica cuántica era un hecho también, y demasiado convincente para permitirnos cambios ahora. Por tanto, se podía establecer – contra todas las apariencias exteriores – la conexión. Tal vez fue aquel día, hacia la medianoche, cuando súbitamente recordé mi conversación con Einstein, y me acordé de su afirmación: ‘Sólo la teoría decide sobre lo que puede observarse’. Vi con claridad inmediata que la llave para abrir la puerta tan largo tiempo cerrada debía buscarla por esta vía. Por ello fui a dar un paseo nocturno por el parque Fällden para meditar las consecuencias de la afirmación de Einstein. Nosotros habíamos dicho siempre con cierta superficialidad: la trayectoria del electrón puede observarse en la cámara de niebla. Pero tal vez era menos lo que realmente observábamos. Quizá sólo se podía percibir una sucesión discreta de lugares, imprecisamente determinados, del electrón. De hecho, se ven solo gotitas aisladas de agua en la cámara, las cuales, ciertamente, son mucho más extensas que un electrón. La auténtica pregunta debería, por tanto, formularse así: ¿Se puede representar, dentro de la mecánica cuántica, una situación en la cual aproximadamente – es decir, con una cierta imprecisión – se encuentre un electrón en un lugar dado, y también aproximadamente – es decir, de nuevo con una cierta imprecisión – posea una velocidad dada, y se pueden hacer estas imprecisiones tan pequeñas de forma que no se encuentren dificultades con el experimento? Un breve cálculo después de volver al instituto confirmó que se pueden representar matemáticamente tales situaciones, y que para las imprecisiones valen aquellas relaciones que han sido designadas más tarde como relaciones de incertidumbre en la mecánica.”

La expresión matemática a la que se refería no es otra que:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h$$

donde x representa la posición, p el momento lineal (el producto de la masa por la velocidad), Δ la incertidumbre y h la constante de Planck. “Con esto”, continuaba Heisenberg, “quedaba por fin establecida, así me parecía a mí, la unión entre las observaciones de la cámara de niebla y la matemática de la mecánica cuántica. De todos modos había que demostrar ahora que a partir de cualquier experimento sólo pueden surgir situaciones que resultasen compatibles con aquellas relaciones de incertidumbre. Pero esto me parecía de antemano aceptable, ya que los procesos durante el experimento y la observación tienen que obedecer por igual a las leyes de la mecánica cuántica.”

El resultado final fue un artículo, “Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik” (“Sobre el contenido evidente de la cinemática y mecánica de la teoría cuántica”) que se publicó en el volumen 43 (1927) de *Zeitschrift für Physik*. El “Resumen” que abría el artículo ofrece una magnífica idea de su contenido:



Max Born



Niels Bohr y Albert Einstein



Erwin Schrödinger



Werner Heisenberg

“En primer lugar se definen los términos *velocidad*, *energía*, etc. (por ejemplo, para un electrón) que continúan siendo válidos en mecánica cuántica. Se demuestra que solamente se pueden determinar simultáneamente magnitudes canónicamente conjugadas con una incertidumbre característica (§ 1). Esta incertidumbre es la base real para la aparición de las relaciones estadísticas en mecánica cuántica. Se da su formulación matemática mediante la teoría de las transformaciones de Dirac-Jordan (§ 2). Comenzando con los principios básicos obtenidos así, se demuestra cómo se pueden comprender mediante la mecánica cuántica los procesos microscópicos (§ 3). Para ilustrar la teoría, se discuten unos cuantos *gedankenexperiments* [experimentos imaginarios] especiales (§ 4).”

Justo al final del artículo, Heisenberg extraía una conclusión con implicaciones filosóficas de largo alcance:

“Si se supone que la interpretación de la mecánica cuántica ya es correcta en sus puntos esenciales, es aceptable esbozar brevemente las consecuencias del principio. No hemos supuesto que la teoría cuántica – en oposición a la teoría clásica – es una teoría esencialmente estadística en el sentido de que únicamente se pueden extraer conclusiones estadísticas a partir de datos iniciales precisos [...]. Lo que es incorrecto en la formulación fuerte de la ley causal ‘Si conocemos exactamente el presente, podemos predecir el futuro’, no es la conclusión, sino premisa. No podemos conocer, por cuestiones de principio, el presente en todos sus detalles [...]. Como el carácter estadístico de la teoría cuántica está tan íntimamente ligado a todas las percepciones, uno se puede ver conducido a la presunción de que detrás del universo estadístico de la percepción se esconde un mundo ‘real’ regido por la causalidad. Pero tales especulaciones nos parecen – y hacemos hincapié en esto – inútiles y sin sentido. La física tiene que limitarse a la descripción formal de las relaciones entre observaciones. Se puede expresar mejor la verdadera situación de la siguiente manera: Dado que todos los experimentos están sujetos a las leyes de la mecánica cuántica, y por consiguiente [al principio de incertidumbre], se sigue que la mecánica cuántica establece el fracaso final de la causalidad.”

La interpretación de Copenhague

Con tales elementos – rechazados firmemente por físicos como Einstein o Planck – se elaboró lo que se denominó “*Interpretación de Copenhague*” de la mecánica cuántica, por el papel destacado que Niels Bohr desempeñó en su formulación y, acaso aún más, en su divulgación. Esta interpretación se puede resumir de la siguiente manera: la función de onda que surge de la ecuación de Schrödinger está constituida por la suma “superposición” de una serie de funciones de onda (autofunciones), asociadas a las diferentes situaciones físicas posibles, multiplicadas cada una por un cierto valor (se trata, recordemos el título de los artículos de Schrödinger, de un problema matemático de autovalores de operadores). En prin-

cipio, si no se produce ninguna “interferencia” con el exterior, el sistema dado por la función de onda principal evoluciona de manera continua, regida por la ecuación de onda de Schrödinger. Pero esta situación dominada por la continuidad, y en este sentido similar a la que se da en la física clásica, no se mantiene cuando se realizan medidas. Y en este punto hacía su entrada “el observador” (o el “aparato con el que se realiza la medida”), que en la física cuántica es, según la interpretación de Copenhague, especialmente importante. Existe, supuso Bohr, una separación neta entre objeto observado y aparato observador, con el primero obedeciendo las leyes ‘cuánticas’ mientras que el segundo obedece las leyes ‘clásicas’. Entre los dos existe un cierto tipo de “corte” conceptual. Este es un punto delicado, porque, ¿dónde hay que situar el “corte”? una cuestión a la que se optó por suponer, sin pruebas concluyentes, que los resultados netos de la teoría no dependían de manera crítica de donde se situase al corte. Cuando se realiza una medida (o una observación), se produce un “colapso de la función de onda”; esto es, el sistema – no sabemos cómo – elige una situación determinada, expresada por una de las autofunciones mencionadas antes. Lo único que nos dice la mecánica cuántica es la probabilidad de que se produzca una u otra de esas situaciones, una probabilidad asociada a los coeficientes que aparecen en cada uno de los sumandos que forman la función de onda completa. Hay que resaltar que antes de la medición, el sistema se encuentra en un estado en el que se “superponen” estados cuánticos diferentes.

Erwin Schrödinger imaginó una situación en la que se mostraba con claridad el problema de fondo de la interpretación de Copenhague. Se trata del célebre “gato de Schrödinger”, que presentó en un artículo que publicó en tres partes en la revista *Die Naturwissenschaften*, titulado “Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik” (“La situación actual de la mecánica cuántica”). Veamos como lo introdujo:

“Se mete un gato en una cámara de acero, junto con el siguiente dispositivo diabólico (que debe asegurarse contra cualquier interferencia directa del gato): en un contador Geiger existe un pequeño trozo de sustancia radiactiva, *tan* pequeña que *acaso* en el curso de una hora uno de los átomos se desintegrará, pero también, con igual probabilidad, tal vez ninguno lo hará; si sucede esto [que se produzca la desintegración], el tubo del contador genera una descarga y mediante un relé se pone en acción un martillo que rompe un pequeño frasco de ácido cianhídrico. Si hemos dejado el sistema completo durante una hora, sin intervenir en él de ninguna manera, podríamos decir que el gato todavía vive *si* en ese intervalo no se ha desintegrado ningún átomo. El primer átomo que se hubiera desintegrado lo habría envenenado. La función ψ del sistema completo expresaría esto al estar compuesta por el gato muerto y el gato vivo (perdón por la expresión) mezclados o esparcidos en partes iguales.”

Lo que Schrödinger estaba señalando es el papel que desempeña la *superposición de estados* en la mecánica cuántica. Según el colapso de la función de onda

de la interpretación de Copenhague, cuando el observador realiza una medida, ésta se concreta, con una cierta probabilidad, en un estado de todos los posibles que alberga la función de onda completa original. Pero, ¿qué sucede mientras tanto, cuando no se ha hecho la medida? Parece que la respuesta inmediata no plantea problemas cuando se trata de átomos, pero ¿y cuando, como ponía en evidencia Schrödinger, se trata de objetos macroscópicos?

La mecánica cuántica de Heisenberg y Schrödinger – también la formulación de Dirac – abrió un mundo nuevo, científico al igual que tecnológico, pero en realidad no era sino el primer paso. Existían aún muchos retos pendientes, como, por ejemplo, hacerla compatible con los requisitos de la teoría de la relatividad especial; o construir una teoría del electromagnetismo, una electrodinámica, que incorporase los requisitos cuánticos. Si Einstein había enseñado, y la física cuántica posterior incorporado en su seno, que la luz, una onda electromagnética, estaba cuantizada, esto es, que al mismo tiempo que tenía las propiedades de una onda también se comportaba como una “corriente” de fotones independientes, y si la electrodinámica que Maxwell había construido en el siglo XIX describía la luz únicamente como una onda, sin ninguna relación con la constante de Planck, entonces era evidente que algo fallaba, que también había que cuantizar el campo electromagnético. Y no solo eso, hacia 1927 la mecánica cuántica era básicamente – salvo aplicaciones a la física del estado sólido – “física atómica”; el conocimiento del núcleo, la física nuclear (que aparecerá en otro capítulo del presente libro), estaba en un estado muy imperfecto. Pero salvo eso, se consideraba que el edificio básico de la mecánica cuántica estaba completo. Una muestra de esa optimista visión es lo que Max Born y Werner Heisenberg decían en las “Conclusiones” de su presentación en el quinto Consejo Solvay que tuvo lugar del 24 al 27 de octubre de 1927 (fue el primero de esos Consejos al que asistieron físicos alemanes después de la Primera Guerra Mundial): “A modo de resumen, queremos hacer hincapié en que mientras creemos que [lo que tiene que ver] con un tratamiento mecánico-cuántico del campo electromagnético no está todavía completo, consideramos que la *mecánica cuántica* es una teoría cerrada, cuyos fundamentos físicos y bases matemáticas no son susceptibles de ninguna modificación”.

CAPÍTULO 2

Gotinga y los primeros años de María Goeppert

María Goeppert

María Goeppert (Göppert de acuerdo con la ortografía alemana) nació el 28 de junio de 1906 en Katowice, una ciudad de la Alta Silesia que entonces formaba parte de Alemania, aunque en virtud del Tratado de Versalles – firmado el 28 de junio de 1919, pero que entró en vigor el 10 de enero de 1920 – pasó a pertenecer a Polonia. Fue el único descendiente del doctor Friedrich Goeppert (1870-1927) y de María Wolff, quien hasta su matrimonio había ejercido de maestra especializada en francés a la vez que daba clases de piano.

En 1910 la familia se trasladó a Gotinga, la pequeña ciudad situada en la Baja Sajonia, fundada en la Edad Media, cuya universidad, la Georg-August-Universität, establecida en 1737 bajo los auspicios de George II, rey de Gran Bretaña e Irlanda, el último rey británico nacido fuera del país (nació en Hannover y desde 1727 era príncipe elector del Sacro Imperio Romano Germánico), ocupaba la mayor parte de la actividad de la villa. El motivo del traslado familiar fue la cátedra de Pediatría de la Universidad que obtuvo Friedrich Goeppert. Continuaba así una tradición familiar que se remontaba a seis generaciones de catedráticos de universidad (varios de sus hermanos también lo fueron). Friedrich no se limitó a cumplir con sus deberes universitarios: también fundó una clínica de niños. Muchos años más tarde María, en una serie de conversaciones que mantuvo con Joan Dash y que esta incluyó en su libro *A Life of One's Own*, manifestó que su padre “era una persona amable al que todo el mundo quería [...]. Cuando estaba enferma y él venía a mi habitación, siempre tenía la sensación de sentirme mejor. Y muchos otros niños decían lo mismo. Cuando por la mañana salía hacia el hospital, algunas

veces y especialmente después de la Navidad, se encontraba con un grupo de niños que le decían: ‘Oh, *Herr Goeppert*, quiero contarle lo que me han regalado por Navidad’. Y yo le preguntaba: ‘¿Quiénes son?’ Y me decía: ‘No lo sé’. Pero todos ellos, en algún momento, habían estado enfermos, y habían ido a verle y le querían. Todo el mundo le quería”. También reconoció que estuvo más apegada a su padre que a su madre: “Bueno, mi padre era más interesante. Después de todo era un científico.”

Efectivamente, fue su padre quien despertó y estimuló el interés de María por la ciencia. Recordaba, por ejemplo, que debía tener alrededor de tres años cuando al ver la Luna mediada le preguntó qué era aquello, y su padre se lo explicó. En otra ocasión, cuando tenía siete años, le preparó unas gafas especiales para que pudiese ver un eclipse de Sol, y cuando éste se produjo le explicó cuidadosamente por qué se producía. “Cualquier pregunta relevante que le hiciera, me la contestaba.” También paseaban juntos por el campo que rodeaba a Gotinga, descubriendo la naturaleza.

No era aquella la educación habitual que recibían las niñas y muchachas, pero *Herr Professor Goeppert* pensaba de otra manera, diciéndole que no debería crecer para convertirse únicamente en un ama de casa sin otros propósitos. Y el ambiente en que creció María en Gotinga favoreció que así fuese. Los *Professoren* alemanes eran, como se les llamó, “mandarines” poderosos que disfrutaban de unas condiciones de vida excelentes. Además, el que Gotinga fuese una localidad pequeña favorecía que se relacionasen entre ellos, con el añadido ocasional en esas relaciones de algunos de sus mejores estudiantes. El matemático David Hilbert, al que María consideraba “El rey de Gotinga”, vivía al lado de la familia Goeppert.

La Primera Guerra Mundial

Solo cuatro años después de haber llegado a Gotinga, el mismo día que María cumplió ocho años, esto es el 28 de junio de 1914, el archiduque Francisco Fernando, heredero del trono de Austria-Hungría, era asesinado en Sarajevo junto a su esposa, Sofía, duquesa de Hohenberg, por los disparos de un terrorista serbio de diecinueve años, Gavrilo Princip. A primeros de julio, y con el apoyo del káiser Wilhelm II, Viena decidió presentar un ultimátum a Serbia, redactado en términos difícilmente aceptables. El 23 de julio la nota llegaba a poder del Gobierno serbio, con la indicación de que disponían de 48 horas para responder, sin discusiones ni negociaciones. El día 25, Serbia contestaba que aceptaba todas las condiciones menos una, la que preveía la participación de agentes austrohúngaros en investigaciones en territorio serbio. Inmediatamente, el Imperio austrohúngaro rompió, como quería desde un principio, las relaciones diplomáticas y el 28 declaraba la guerra a Serbia. A renglón seguido, el día 30, Rusia movilizaba a todas sus fuerzas; el día siguiente, Alemania exigía a Rusia la desmovilización. No habiendo obtenido respuesta, el 1 de agosto Alemania y Francia decretaban la movilización general.

No era aquella la educación habitual que recibían las niñas y muchachas, pero *Herr Professor Goeppert* pensaba de otra manera, diciéndole que no debería crecer para convertirse únicamente en un ama de casa sin otros propósitos. Y el ambiente en que creció María en Gotinga favoreció que así fuese.

Ese mismo día Alemania declaraba la guerra a Rusia; a Francia lo haría el día 3. Por su parte, los británicos, que habrían preferido una mediación, declaraban la guerra a Alemania el 4, el mismo día que el ejército alemán invadía Bélgica (lo que abría a los germanos la puerta del Canal de la Mancha). Comenzaba la Gran Guerra, como se la denominó mientras no hubo necesidad de numerarlas, a la que pronto se unirían Montenegro (7 de agosto), Japón (23 de agosto) y Turquía (29 de octubre). Mucho más tarde, el 6 de abril de 1917, Estados Unidos se unió al bando aliado.

En otras palabras, el mundo se oscurecía y pronto se tiñó del rojo de la sangre. Y Gotinga no quedó al margen. Veamos en este sentido lo que escribió en sus memorias Max Born, probablemente uno de los nacionalistas germanos más ecuanímes:

“En 1914 tuvo lugar un estallido patriótico de entusiasmo en todos los países. En Gotinga lo tuvimos en todo su apogeo: banderas, desfiles y canciones. Las tropas desfilaban por las calles entre las gentes que les lanzaban flores. Banderas por todas partes, en las calles y en los trenes que llevaban a los soldados al frente [...]. El delirio patriótico se vio acompañado de rumores incontrolados y de una caza de espías: se decía que los pozos estaban envenenados, los caballos del regimiento paralizados, puentes dinamitados. Todos los extranjeros fueron puestos bajo custodia [...]. Los periódicos estaban repletos de artículos patrióticos. Yo odiaba la guerra, pero no podía escapar a la influencia de la propaganda. Creía, como todos los demás, que Alemania había sido atacada, que estaba luchando por una causa noble y que su existencia estaba en juego [...].

No puedo negar que durante aquel tiempo me sentí muy en contra de los ingleses, de los franceses y sobre todo de los rusos. Todos los días nos contaban las abominables atrocidades de los cosacos de la Prusia del Este. La idea de estas ‘hordas asiáticas’ destruyendo los agradables y ordenados pueblos alemanes torturaba a las mujeres y niños y a mí me enfurecía”.

En aquella atmósfera de excitación, el 4 de octubre de 1914, movidos en parte por las negativas repercusiones que había tenido en el mundo la invasión de Bélgica, 93 intelectuales alemanes daban a conocer lo que denominaron *Aufruf an die Kulturwelt* (Llamamiento al mundo civilizado). El escritor Ludwig Fulda

preparó el primer borrador, su colega Hermann Sudermann lo editó y el novelista berlinés Georg Reicke compuso la versión definitiva, que traducida inmediatamente a diez idiomas, fue enviada en miles de cartas a naciones neutrales. Mucho más que cualquier otro hecho, este documento enturbiaría durante años las relaciones entre los científicos de las Potencias Centrales (los alemanes en particular) y los Aliados. Dada su importancia, es conveniente reproducir su contenido:

“Nosotros, representantes de la ciencia y el arte alemanes, delante de todo el mundo, contra las mentiras y calumnias detrás de las que nuestros enemigos pretenden ocultar la causa pura de Alemania, en la difícil lucha que se le ha impuesto [...] proclamamos la verdad.

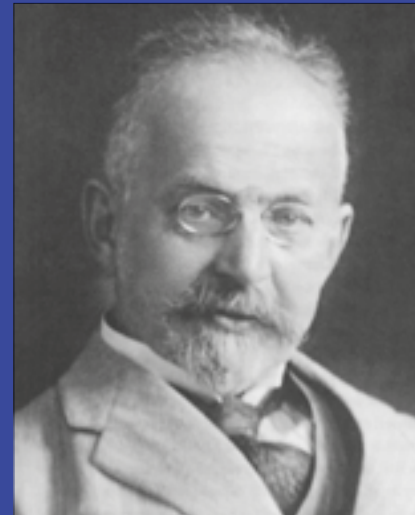
No es verdad que Alemania haya sido la causante de la guerra. Ni el pueblo, ni el Gobierno, ni el emperador la han querido. Se ha hecho todo lo posible por evitarla desde la parte alemana. El mundo posee sobre esta cuestión documentos irrefutables. A lo largo de los veintiséis años de su reinado, Wilhelm II ha demostrado muchas veces que es el protector de la paz mundial; muchas veces sus adversarios lo han reconocido. Y durante años se han burlado de este mismo emperador, que ahora osan llamar un Atila, a causa de su amor a la paz. Sólo ha sido cuando fuerzas dominantes, que desde hace mucho tiempo se encontraban al acecho en nuestras fronteras, se han lanzado sobre nuestro pueblo desde tres flancos, que éste se ha levantado como un solo hombre.

No es verdad que hayamos violado de una manera criminal la neutralidad de Bélgica. Nos habríamos destruido a nosotros mismos si hubiésemos tomado la delantera.

No es cierto que nuestros soldados hayan tocado la vida y la propiedad de un solo ciudadano belga sin haber sido empujados a ello por sus defensores. Porque, todavía y siempre, a pesar de todas las advertencias, la población les ha preparado emboscadas para disparar sobre ellos, mutilando heridos, asesinando médicos mientras desempeñaban su obra de samaritanos.

No es verdad que nuestras tropas hayan saqueado brutalmente Lovaina. Ellas se han visto obligadas a tomar represalias contra los habitantes furiosos que les han asesinado traidoramente, y con un corazón cariacontecido han bombardeado la ciudad. La mayor parte de Lovaina ha sido conservada. El célebre Ayuntamiento permanece brillantemente intacto. Con peligro de sus vidas, nuestros soldados lo han protegido de las llamas. Si se han destruido obras de arte durante esta guerra terrible, si otras seguirán el mismo camino, todo alemán lo lamentará. Pero mientras que no nos dejaremos sobrepasar por nadie en lo que al amor al arte se refiere, rechazamos exponernos a una derrota por la conservación de un monumento artístico.

No es verdad que nuestra forma de hacer la guerra ignore el derecho de gentes. Tal forma no conoce crueldades indisciplinadas.



Friedrich Goeppert, padre de María



Vista de Kattowitz, ciudad natal de María Goeppert Mayer



Monumento a Gauss y Weber, en Gotinga



Club de Matemáticas de Gotinga (1902). En el centro, apoyado en la mesa, está Felix Klein; a su lado, a la izquierda, David Hilbert; a la derecha, Karl Schwarzschild.



Portada de la revista Simplicissimus, julio 1916

No es verdad que la lucha contra lo que se ha llamado nuestro militarismo no sea una lucha contra nuestra cultura, como pretenden hipócritamente nuestros enemigos. Sin el militarismo alemán, la cultura alemana habría desaparecido de la faz de la tierra hace mucho tiempo. Es para proteger esa cultura, que un país que durante siglos ha sufrido más invasiones que ningún otro, ha salido de sus fronteras. El ejército y el pueblo alemanes forman una unidad. Semejante convicción une hoy día a setenta millones de alemanes, sin distinción de educación, condición social y partido.

No podemos arrancar de nuestros enemigos el arma envenenada de la mentira. Lo único que podemos hacer es proclamar en el mundo entero que han presentado un falso testimonio; y es a vosotros, que nos conocéis, que hasta ahora habéis vigilado con nosotros los bienes supremos de la humanidad, a quien apelamos.

¡Creednos! Creed que llevaremos el combate hasta el final, como un pueblo cultivado al que la herencia de Goethe, de Beethoven y de Kant es tan sagrada como su hogar y su tierra. Nos hacemos garantes de ello con nuestro nombre y nuestro honor”.

Entre los firmantes de este llamamiento figuraban 15 científicos ilustres, todos catedráticos: Adolf von Baeyer (Química, Múnich), Karl Engler (Química, Karlsruhe), Emil Fischer (Química, Berlín), Wilhelm Förster (Astronomía, Berlín), Fritz Haber (Química, Berlín), Ernst Haeckel (Zoología, Jena), Gustav Hellmann (Meteorología, Berlín), Felix Klein (Matemáticas, Gotinga), Philipp Lenard (Física, Heidelberg), Walter Nernst (Química-Física, Berlín), Wilhelm Ostwald (Química, Leipzig), Max Planck (Física, Berlín), Wilhelm Röntgen (Física, Múnich), Wilhelm Wien (Física, Wurzburg) y Richard Willstätter (Química, Berlín). De los grandes nombres de la ciencia germana sólo el matemático de Gotinga, David Hilbert, rehusó firmar.

Los restantes firmantes se repartían de la siguiente manera: 17 artistas, 12 teólogos, 9 poetas, 7 historiadores, 7 juristas, 7 médicos (incluyendo al conocido Paul Ehrlich, Premio Nobel de Medicina en 1908 y catedrático de Bacteriología de la Universidad de Berlín), 5 escritores de temas artísticos, 4 filósofos, 4 filólogos, 3 músicos, 2 politólogos y el director del Deutsches Theater de Berlín.

En la atmósfera social que reinaba entonces en Alemania era complicado oponerse públicamente a semejante declaración (en otros países tampoco era fácil defender posiciones no beligerantes, como demuestra el caso de Bertrand Russell en Inglaterra). Sin embargo, pocos días después de la publicación de ese manifiesto, un destacado pacifista alemán, Georg Friedrich Nicolai, catedrático de Fisiología en la Universidad de Berlín, preparó una réplica que hizo circular entre sus colegas universitarios. Sólo dos personas se adhirieron a ella: Albert Einstein, ya instalado en Berlín procedente de Zúrich, y Wilhelm Förster, antiguo director del Observatorio de Berlín, uno de los principales inspiradores de la Sociedad Ética

Alemana, y que, como hemos visto, ¡también había firmado el Manifiesto de los 93! El documento en cuestión, titulado *Aufruf an die Europäer (Llamamiento a los europeos)*, fue distribuido a mediados de octubre y únicamente un estudiante de filosofía de Marburg, Otto Buck, se solidarizó con él, pero ninguna publicación independiente lo difundió. Es un excelente ejemplo del pacifismo que luchaba por abrirse paso en aquellos años:

“Nunca jamás una guerra ha interrumpido tan intensamente la cooperación cultural. Y lo ha hecho en el mismo momento en que el progreso de la técnica y de las comunicaciones sugiere claramente que reconozcamos la necesidad de relaciones internacionales que necesariamente se dirigirán en la dirección de una civilización universal. Tal vez somos tan penosa e intensamente conscientes de la ruptura porque ya existían lazos de relación internacionales muy numerosos.

Difícilmente podemos sorprendernos. Todo aquel al que le importe algo una cultura mundial común está doblemente comprometido a luchar por el mantenimiento de los principios en que se basa. Y sin embargo, aquellos en quienes habría que haber supuesto tales sentimientos – principalmente los científicos y los artistas – hasta el momento han dicho casi exclusivamente cosas que hacen sospechar que han abandonado el deseo de que continúen las relaciones internacionales. Se han expresado con un espíritu hostil; no han hablado en defensa de la paz.

Esa actitud no se puede disculpar en nombre de ninguna pasión nacional, es indigna de lo que hasta ahora el mundo ha denominado cultura, y si se convirtiese en la pauta general entre los intelectuales sería una profunda desgracia. Pero no sólo una desgracia para la cultura, sino que – de ello estamos firmemente convencidos – también haría peligrar la propia existencia de las naciones para cuya protección se ha desencadenado esta barbarie.

La tecnología ha empequeñecido el mundo. De hecho, las naciones de la gran península europea parecen hoy estar tan próximas como en los viejos tiempos lo estaban las ciudades-estado de cada una de las pequeñas penínsulas mediterráneas. Viajar está tan difundido, la exportación y la importación internacionales tan interrelacionadas, que Europa – casi se podría decir, el mundo entero – constituye una unidad.

Sería, pues, un deber de los europeos con educación y buena voluntad intentar al menos impedir que Europa sucumba, por una falta de organización internacional, al mismo destino trágico que en otro tiempo destruyó a Grecia. ¿Debe agotarse poco a poco Europa y morir por una guerra fratricida?

La guerra que ruge difícilmente puede dar un vencedor; todas las naciones que participan en ella pagarán, con toda probabilidad, un precio extremadamente alto. Por consiguiente, parece no sólo sabio sino obligado para los hombres instruidos de todas las naciones el que ejerzan su influencia para que se firme un tratado de paz que no lleve en sí los gérmenes de guerras futuras, cualquiera que sea

el final del presente conflicto. La inestable y fluida situación en Europa, creada por la guerra, debe utilizarse para transformar el continente en una unidad orgánica. Técnica e intelectualmente, las condiciones están maduras para tal proceso.

Este no es el lugar para discutir cómo se puede lograr esa nueva organización. Nuestro único propósito es afirmar nuestra profunda convicción de que ha llegado el momento de que Europa se una para defender su territorio, su gente y su cultura. Estamos manifestando públicamente nuestra fe en la unidad europea, una fe que creemos es compartida por muchos; esperamos que esta afirmación pública de nuestra fe pueda contribuir al crecimiento de un movimiento poderoso hacia tal unidad.

El primer paso en esa dirección sería el que unan sus fuerzas todos aquellos que aman realmente la cultura de Europa; todos aquellos a los que Goethe proféticamente llamó ‘buenos europeos’. No debemos abandonar la esperanza de que, hablando al unísono, su voz pueda, incluso hoy, elevarse por encima del choque de las armas, en particular si se les unen aquellos que ya disfrutaban de renombre y autoridad.

El primer paso, lo repetimos, es que los europeos unan fuerzas. Si como es nuestra esperanza más profunda, se encuentran suficientes *europeos* – gente para la que Europa es una causa vital, más que un término geográfico – en Europa, nos dedicaremos a organizar una Liga de Europeos. Esta Liga podría entonces levantar su voz y ponerse en acción.

Lo único que pretendemos nosotros es realizar el primer movimiento, lanzar el reto. Si piensa como nosotros, si también está decidido a crear un amplio movimiento en favor de la unidad europea, entonces le rogamos que contribuya con su firma”.

Como ya indiqué, el manifiesto apenas encontró apoyo. En su libro *Die Biologie des Krieges* (*La biología de la guerra*), publicado en Suiza en 1917, Nicolai señaló que “aun cuando encontramos numerosas aprobaciones en el envío privado del manifiesto, ni los que lo aprobaban querían firmarlo: a uno le parecía que el pasaje sobre Grecia no era históricamente del todo exacto, otro opinaba que era demasiado tardío, otro que era demasiado prematuro; otro consideraba inoportuno que la ciencia se mezclase con el comercio mundano, etc. Pero la mayoría era demasiado cobarde, o pensaba de otra manera. Incluso los mejores alemanes no querían por aquellos días convertirse en buenos europeos, o no se atrevían. Pero como el manifiesto sólo podía tomar valor si era apoyado por la autoridad de hombres reconocidos, dejamos de lado nuestro plan”.

Los últimos momentos de la guerra supusieron para Alemania una acumulación progresiva de situaciones revolucionarias de las que nacería, pocos meses después, la República de Weimar. La pérdida de poder de líderes como Ludendorff y Hindenburg y el hecho de que las masas considerasen al káiser como el

responsable de sus desgracias pasadas y presentes, así como el obstáculo más importante para la firma de un armisticio con las Potencias Aliadas, hizo que el orden establecido quedara virtualmente colapsado. El 28 de octubre de 1918 la flota alemana se negaba a zarpar de Kiel; los marineros izaban banderas rojas. La rápida difusión a través de toda Alemania de consejos de trabajadores y soldados que seguían el modelo de la reciente revolución rusa aumentó la confusión.

En esta situación, el káiser abdicó, huyendo a Holanda con su familia. El 9 de noviembre, los ministros socialdemócratas, que habían entrado por primera vez en el Gobierno del Reich un mes antes, proclamaban la República. El 10 se constituía un nuevo Gobierno. El 11 se firmaba el armisticio que acababa con la guerra.

En enero de 1919 estalló en Berlín una rebelión espartaquista que fue reducida con dureza por el Gobierno provisional socialdemócrata. Rosa Luxemburgo y Karl Liebknecht, los líderes de la Liga Espartaquista, fueron asesinados por un grupo de oficiales derechistas. En esta situación se celebraron las elecciones para una Asamblea Nacional. El partido socialdemócrata no obtuvo la mayoría necesaria y tuvo que coaligarse con demócratas y centristas. Friedrich Ebert fue nombrado primer presidente de la República. Como Berlín se consideraba una ciudad demasiado peligrosa, la Asamblea Nacional se instaló en Weimar, aunque el Gobierno permaneció en la capital. Nació así la “República de Weimar”, cuya Constitución fue aprobada el 31 de julio de 1919.

La nueva República se encontró inmediatamente con un conjunto de circunstancias que hicieron todavía más profunda la herida producida por la derrota. Las condiciones que estableció el Tratado de Versalles fueron consideradas como una afrenta por la mayoría del pueblo alemán. Además de liquidar prácticamente el imperio colonial alemán, el Tratado amputó una séptima parte del territorio que poseía Alemania antes de la guerra, así como una décima parte de su población. Alsacia y Lorena debían ser devueltas a Francia, que pasaba a ocupar el territorio alemán al oeste del Rin, ocupación que debería irse deshaciendo gradualmente en tres etapas a lo largo de quince años. El Sarre, con su carbón, también dejaba de ser administrado por Alemania durante quince años, al cabo de los cuales un referéndum decidiría su destino. Asimismo, en el este del territorio un referéndum establecería el destino de la Alta Silesia. Por si fuera poco, los alemanes se veían obligados a tratar a Polonia, a quien habían dominado durante años, como si fuera una gran potencia. En cuanto a pagos directos, se fijó una indemnización de 132.000 millones de marcos oro, más el 26 por ciento en impuestos a la exportación, a recaudar a lo largo de 42 años.

A todo esto hay que unir otros hechos, como, por ejemplo, el que franceses y belgas ampliasen en varias ocasiones la extensión del territorio que ocupaban como venganza por infracciones al Tratado de Versalles (la más seria de estas acciones fue la ocupación de la región del Ruhr desde el 11 de enero de 1923 hasta finales de 1924).

Pero si la situación político-social era mala, la económica era para los ciudadanos, incluyendo a los *Herren professoren*, simplemente catastrófica. La inflación, generada por la guerra y las condiciones impuestas en Versalles, alcanzó una magnitud hasta entonces sin precedentes en la historia. Inmediatamente antes de la Primera Guerra Mundial, en 1913, el marco alemán, el chelín inglés, la lira italiana y el franco francés valían, aproximadamente, lo mismo, y un dólar equivalía poco más o menos a cuatro veces un marco. El año siguiente al armisticio el marco bajó a menos del 10 por ciento de su valor anterior, manteniéndose ahí hasta 1921, momento en que comenzó su caída en picado. Al final de 1923, poco antes de que se lograra la estabilización con la introducción del *Rentenmark*, era posible cambiar un chelín, una lira o un franco por más de ¡un billón de marcos!, aunque, por supuesto, nadie estaba dispuesto a aceptar marcos. Naturalmente, no fue sólo en Alemania en donde se produjo inflación; en Austria los precios llegaron a subir hasta 14.000 veces su valor anterior a la guerra; 2.500.000 en Polonia, 4.000 millones en Rusia.

Unos párrafos de la autobiografía de Richard Willstätter, que había ganado el Premio Nobel de Química en 1915 y que desde 1916 era catedrático y director del laboratorio de Química de la Universidad de Múnich, sirven para apreciar la situación en que llegaron a encontrarse los profesores germanos:

“Ya en diciembre de 1922 no tenía dinero suficiente para los regalos de Navidad. Los grandes bancos no habían entendido la inflación. Desde comienzos de diciembre hasta alrededor de mediados de enero, no recibí ningún aviso del banco en el que la universidad solía depositar nuestras distintas ganancias. Como necesitaba dinero, protesté; entonces se me informó que ‘para evitar a los clientes el alto coste del correo, a partir de ahora solamente enviaremos una notificación al mes’. El secretario general de la universidad, Krebs, poseía un conocimiento más sutil de la inflación que los bancos; demoraba los pagos bastante más de un mes, incluso varios. Las cuotas de los cursos, e incluso de los exámenes, se pagaban entonces tan tarde que, en una época de inflación acusada, quedaban despojados de todo valor”.

La familia Goeppert no se libró de las penurias que produjo la guerra, aunque sufrió menos que otros. Ayudada por el hecho de que no pocos pacientes de su marido procedían del campo y no tenían para pagarle más que con alimentos, Frau Goeppert se ingenió para aliviar el estricto racionamiento de víveres que se impuso después del armisticio. Llegó incluso a comprar tres cerditos, dos para la clínica de su marido y uno para ellos.

Al final de la guerra, María comenzó a asistir a la *Höhere Töchterschule*, una escuela secundaria superior para chicas que pretendían ser algo más que amas de casa. Allí destacó sobre todo en idiomas y matemáticas. En 1921 dejó esa escuela para entrar en el *Frauenstudium*, una escuela privada dirigida por sufragistas que preparaba a sus alumnas durante tres años para que pudieran obtener el título,

Al final de la guerra, María comenzó a asistir a la *Höhere Töchterschule*, una escuela secundaria superior para chicas que pretendían ser algo más que amas de casa. Allí destacó sobre todo en idiomas y matemáticas. En 1921 dejó esa escuela para entrar en el *Frauenstudium*, una escuela privada dirigida por sufragistas que preparaba a sus alumnas durante tres años para que pudieran obtener el título, el *Abitur*, que permitía entrar en la universidad.

el *Abitur*, que permitía entrar en la universidad. Sin embargo, al cabo de un año, aquellas sufragistas perdieron todo su dinero, así como la casita que utilizaban para la escuela, como consecuencia de la terrible inflación en curso. Y en Gotinga no existía otra institución similar. Sus maestras recomendaron a María – que entonces tenía 16 años – que asistiera el siguiente año a una escuela de muchachos, pero la idea no le resultó atractiva y respondió que se prepararía ella sola y que se examinaría el año siguiente. Sus profesoras le dijeron que no conseguiría superar el examen, y que no podría acceder a la universidad. A pesar de ello, no se desanimó y, efectivamente, el año siguiente logró que la admitieran al examen en Hannover. “Éramos cuatro o cinco chicas de nuestra pequeña escuela”, contó a Dash, “y unos treinta chicos. Y, por supuesto, estábamos muy impresionadas porque los chicos eran mucho más mayores que nosotras, y parecían muy maduros, aunque también muy preocupados.” El *Abitur*, que duraba una semana de exámenes escritos y un día de examen oral, constaba de preguntas sobre matemáticas, francés, inglés, alemán, física, historia y química. Solo uno de los chicos lo superó, mientras que todas las jovencitas lo aprobaron. Ya podía entrar en la universidad.

Matemáticas y Física en la Universidad de Gotinga

La Universidad de Gotinga, en la que, como veremos, estudió María Goeppert, es considerada como el prototipo de universidad moderna debido a que su Facultad de Filosofía (donde estaban incluidos los estudios de Ciencias, lo mismo que sucedía en otros países; en España, por ejemplo) gozaba del mismo estatus que las otras tres más antiguas: Teología, Derecho y Medicina. Algo parecido, pero mucho más tarde, sucedió en Berlín, cuya universidad compitió con Gotinga en matemáticas y física. Fue en 1801, después de que Napoleón hubiese derrotado y ocupado parte de su territorio, cuando Wilhelm II de Prusia encargó al educador y lingüista Wilhelm von Humboldt (hermano del famoso explorador y científico Alexander) que fundase una universidad moderna en Berlín (en 1949, cuando tras

la guerra reabrió sus puertas dentro la República Democrática Alemana, tomó el nombre de Humboldt-Universität, en honor de su fundador).

La gran tradición matemática de Göttingen comenzó con Carl Friedrich Gauss (1777-1855), el “príncipe de las Matemáticas” como se le llamó, autor de obras memorables entre las que sobresale *Disquisitiones Arithmeticae* (1801), quien estudió, enseñó y trabajó allí durante cerca de medio siglo: fue director del Observatorio Astronómico y catedrático desde 1807 hasta su muerte. Su obra, inmensa, no se limitó a la matemática pura pues también cultivó la aplicada (astronomía, física, geodesia). Al igual que Goethe y Alexander von Humboldt, Gauss aspiraba al ideal de un conocimiento universal, que no conociese fronteras entre disciplinas como la matemática, la astronomía o la mecánica. Una muestra de la polivalencia de Gauss, de cómo sabía moverse entre distintas aguas, es la colaboración que mantuvo con el físico Wilhelm Weber con quien estableció en 1833 una línea telegráfica de un kilómetro y medio de longitud, una de las primeras que se construyeron en Alemania. Un monumento-memorial ubicado cerca del Observatorio Astronómico, debido al escultor Carl Ferdinand Hartzer e inaugurado el 17 de junio de 1899, los representa a ambos en aquella colaboración.

Uno de sus sucesores en Göttingen, Felix Klein – que enseguida volverá a aparecer – escribió sobre Gauss en *Vorlesungen über die Entwicklung der Mathematik in 19. Jahrhundert* (*Lecciones sobre el desarrollo de la Matemática en el siglo XIX*; 1926), a propósito de los diferentes tipos de investigadores:

“Hay el conquistador audaz que trabaja con enérgica intuición pero conceptos desordenados, que encuentra y saca a la luz nuevos tesoros merced a su instinto y sensibilidad; y hay el cuidadoso administrador que ordena lo ganado, valora correctamente cada cosa, y es capaz de ponerla en su sitio con la claridad y seguridad críticas del agudo entendimiento. Sólo en contados entendimientos se añan esas dotes contrapuestas; con toda razón les da entonces la historia puesto singular, a fuer de dueños y señores de sus respectivos dominios. Por encima de épocas y opiniones. Entre esos pocos elegidos se ha de encontrar sin reserva alguna Gauss [...]. Si se me permite una comparación, Gauss se me antoja semejante a las altas cimas en el panorama de nuestras montañas bávaras tal como se ofrece al espectador desde el norte. Las cumbres que paulatinamente ascienden desde el este culminan en un coloso gigantesco”.

A Gauss le sucedió otra luminaria matemática, Peter Gustav Lejeune-Dirichlet (1805-1859), que prefirió dejar Berlín por Göttingen, donde se encontró con dos jóvenes que también dejaron su marca en la matemática: Bernhard Riemann (1826-1866) y Richard Dedekind (1831-1916), aunque éste, pronto, en 1858, se marchó a Zúrich como catedrático en la Escuela Politécnica Federal (ETH), un puesto que obtuvo recomendado por Dirichlet. Por el contrario, Riemann, que había llegado a Göttingen en 1846, permaneció allí: en 1857 fue nombrado profesor extraordinario y en 1859 ordinario (catedrático). Dos años después de la temprana

muerte de Riemann, Alfred Clebsch (1833-1872) se unió al cuerpo de matemáticos de Göttingen, fundando el mismo año, junto a Carl Neumann, una nueva revista, *Die Mathematische Annalen*, con la intención de competir con la publicación (creada en 1826) dominada por los matemáticos berlineses, el *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, más conocido como *Crelle's Journal* en honor a su fundador y editor hasta su muerte en 1855, August Leopold Crelle.

Desgraciadamente, Clebsch falleció pronto, y su cátedra fue ocupada brevemente por Lazarus Fuchs (1833-1902), que llegó en 1874 y se marchó a Heidelberg al año siguiente, siendo sustituido por Hermann Schwarz (1843-1921), quien aunque permaneció más tiempo no hizo de Göttingen su hogar académico permanente: se trasladó a la Universidad de Berlín en 1892 para convertirse en sucesor del gran Karl Weierstrass.

Con tantas muertes, llegadas y salidas, la gran tradición matemática de Göttingen sufrió, hasta el punto que se podía decir que sus días de gloria habían pasado. Hasta la llegada en 1886 de Felix Klein (1849-1925).

La carrera de Klein como catedrático se había iniciado en 1872 en la Universidad de Erlangen. Fue allí, en su conferencia inaugural, donde presentó lo que se conoce como “Programa de Erlangen”, la tesis de que existen tantas geometrías como grupos de transformación; que una geometría se caracteriza por sus invariantes. Esta es una perspectiva que le permitió argumentar más tarde que la teoría de la relatividad especial no era sino un tipo de geometría (la acorde con la presentación que hizo de la teoría Hermann Minkowski), y que la teoría general de la relatividad era la geometría del grupo de transformaciones generales. En 1875, Klein abandonó Erlangen por una cátedra en la Escuela Técnica de Múnich, donde pasó cinco años. En 1880 pasó a desempeñar una nueva cátedra, esta vez en Leipzig, que dejó en 1886 por Göttingen.

Sus años en Múnich y los primeros de Leipzig fueron los mejores de su actividad matemática. Además de continuar trabajando en geometría, se dedicó con intensidad a estudiar las funciones de variable compleja, desarrollando la teoría de un tipo especial de funciones, denominadas automorfias. En este campo se encontró con un joven matemático francés, Henri Poincaré, que se había introducido en estos problemas estudiando algunos trabajos de Lazarus Fuchs en ecuaciones diferenciales. Poincaré se había ocupado de casos particulares de las funciones automorfias, pero las generalizaciones que introdujo revelaron la existencia de funciones hasta entonces desconocidas, como las zeta-fuchsianas, que, además, podían ser utilizadas, como demostró él mismo, para resolver las ecuaciones diferenciales lineales de segundo orden con coeficientes algebraicos.

Klein entró entonces en una intensa competición matemática con Poincaré, pero el deseo de llegar a resultados antes que éste terminó siendo fatal para él. Poincaré era un rival demasiado poderoso como matemático: se ha dicho que el siglo XIX comenzó bajo la sombra de un gigante, Carl Friedrich Gauss, y terminó

con el dominio de un genio de magnitud similar, Poincaré. En opinión de Jean Dieudonné, él mismo un matemático notable, “ambos eran matemáticos universales en el sentido supremo, y ambos realizaron contribuciones importantes a la astronomía y física matemática. Si los descubrimientos de Poincaré en la teoría de números no son iguales a los de Gauss, sus logros en la teoría de funciones son al menos del mismo nivel, incluso cuando uno tiene en cuenta la teoría de las funciones elípticas y modulares, que deben ser acreditadas a Gauss y que representan su descubrimiento más importante en ese campo, aunque no lo publicó en vida. Si Gauss fue el iniciador de la teoría de las variedades diferenciables, Poincaré desempeñó el mismo papel en la topología algebraica. Finalmente, Poincaré es la figura más importante en la teoría de las ecuaciones diferenciales y es el matemático que, después de Newton, efectuó el trabajo más destacado en mecánica celeste”.

En sus *Vorlesungen über die Entwicklung der Mathematik im 19. Jahrhundert*, Klein reconoció las consecuencias de su competición con Poincaré:

“El precio que tuve que pagar por mi trabajo fue por lo demás extraordinariamente alto, a saber, que mi salud se derrumbó completamente. El año siguiente tuve que cogerme repetidamente vacaciones y renunciar a todo trabajo productivo. Hasta el otoño de 1884 no pude seguir adelante, pero nunca más he vuelto a alcanzar el mismo grado de productividad. Más bien me he dedicado a elaborar mis ideas anteriores y luego, ya en Göttingen, a ampliar mi área de trabajo y dedicarme a tareas generales de organización de nuestra ciencia. Así se entiende que en adelante solo haya tocado las funciones automorfas de forma esporádica. Mi actividad propiamente productiva en el ámbito de la Matemática teórica se derrumbó en 1882”.

En Göttingen la capacidad de Klein como organizador floreció, mostrándose en toda su intensidad, especialmente después de que Hermann Schwartz (junto a Ernst Schering, los otros dos catedráticos de matemáticas) abandonase Göttingen. “Cuando Schwartz se marchó a Berlín en 1892”, señaló Richard Courant (otro distinguido miembro de la comunidad matemática de Göttingen) en el obituario que escribió sobre Klein a la muerte de éste, “dejando mano libre a Klein en Göttingen, comenzó un nuevo período de actividad de éste, en el que se implicó en tareas organizativas cada vez de manera más prominente”.

Brilló, asimismo, como profesor. En sus memorias, Max Born recordaba que Felix Klein “era el profesor más brillante; de hecho, demasiado brillante para mí. Uno tenía que ser realmente un matemático puro para disfrutar con ellas [las matemáticas], incluso cuando trataba de aplicaciones a la física y a la tecnología, algo que le gustaba hacer.” Un fruto especialmente destacado de las actividades organizativas de Klein fue lograr que le fuese ofrecida en 1895 una cátedra en Göttingen a David Hilbert (1862-1943). De hecho, Klein llevaba intentando atraer a Hilbert – a quien consideraba la gran promesa de la matemática germana – a Göttingen desde

que Schwartz renunció a su cátedra en 1892, pero no tuvo éxito y el puesto fue a parar a Heinrich Weber. Cuando éste decidió aceptar una oferta de Estrasburgo en 1895, Klein ya tenía mucho más poder en la universidad y logró su propósito sin mayores problemas. Hilbert se instaló en Göttingen, en la que permaneció el resto de su vida, dándole una fuerza y prestigio matemático que probablemente ningún otro de sus contemporáneos podría haberla proporcionado.

En 1902, Ferdinand Frobenius y Schwarz ofrecieron a Hilbert ocupar la cátedra vacante de Berlín por el fallecimiento de Fuchs. Hasta entonces ningún matemático había rechazado una oferta procedente de la capital prusiana, pero Hilbert lo hizo, aunque, cierto es, con alguna contraprestación: el director de asuntos universitarios en el Ministerio de Educación alemán, Friedrich Althoff, que controlaba prácticamente todos los asuntos de cátedras de las universidades alemanas, accedió a que se crease en Göttingen una nueva cátedra de matemáticas, para un amigo íntimo de Hilbert, además de matemático extraordinario, Hermann Minkowski (1864-1909), entonces en la Escuela Politécnica Federal de Zúrich, donde no hacía mucho había dado clases a un joven estudiante de nombre Albert Einstein, a cuya teoría de la relatividad especial daría la que se convirtió en presentación canónica, cuatridimensional (cuando Minkowski falleció su puesto lo ocupó Edmund Landau). A partir de entonces, la situación de las ciencias exactas en Göttingen no hizo sino mejorar, siempre bajo la guía de Klein. En 1904, Carl Runge (1856-1927) fue designado para ocupar una nueva cátedra de matemática aplicada. Al mismo tiempo que Runge, llegó Ludwig Prandtl (1875-1953), la gran estrella emergente de la aerodinámica. Ambos, Runge y Prandtl, dirigieron un nuevo Instituto de Matemática Aplicada y Mecánica. También bajo la influencia de Klein se fundaron en Göttingen un Instituto de Geofísica, dirigido por Emil Wieckert (1861-1928), y uno Electrotécnico, a cuya cabeza estaba Hermann Theodor Simon (1870-1918). Otro científico distinguido en Göttingen era el astrónomo Karl Schwarzschild (1873-1916), director del Observatorio Astronómico que había dirigido Gauss.

En el capítulo 1 ya aludí al interés de Hilbert por la física teórica, que se manifestó en el que tuviese ayudantes físicos, uno de ellos Max Born (quien, como también se vio en ese capítulo, influyó posteriormente en gran medida en María Goeppert). Otros ayudantes suyos fueron Lothar Nordheim, antiguo pupilo de Born, y el gran matemático, con aportaciones importantes a la física matemática, John Von Neumann, que acababa de llegar a Göttingen. Durante el semestre de invierno del curso 1926-1927, Hilbert dio un curso consistente en dos clases semanales de dos horas cada una, titulado “Mathematische Methoden der Quantentheorie”. Fruto de aquel curso fue un artículo dedicado a la mecánica cuántica firmado por Hilbert con Von Neumann y Nordheim, en el que intentaban resolver un problema relacionado con la teoría de las transformaciones (que se ocupaba, básicamente, de la equivalencia entre las formulaciones – “representaciones” – de

la mecánica cuántica producidas por Heisenberg y Schrödinger), tal y como la había introducido Paul Dirac.

El que Klein se ocupase de favorecer a la matemática aplicada, siendo como era un matemático básicamente “puro”, no fue una simple y momentánea anécdota. Todo lo contrario, pensaba que la asociación entre matemática básica y aplicada redundaría en beneficio de ambas. Y para llevar a la práctica sus ideas se movió con acierto. Así, fue el principal responsable del establecimiento, en 1898, de la *Göttinger Vereinigung zur Förderung der angewandten Physik und Mathematik* (Asociación de Göttinga para el desarrollo de la matemática y física aplicadas). Más que promover investigaciones específicas, apoyando a científicos particulares, la Asociación se ocupaba de la creación y mantenimiento de institutos en los que se investigase y enseñase en temas definidos. Aunque llegó a tener casi 50 industriales como miembros, el alma de la organización – Klein aparte – fue un químico, Henry Bottinger, director general de la compañía Bayer; cuando él murió, en junio de 1920, la *Göttinger Vereinigung* terminó disolviéndose.

Podemos hacernos una idea del desarrollo que experimentó la matemática en Göttinga sin más que recordar que entre 1890 y 1914, allí se habilitaron como *privatdozenten* (doctores con derecho a dictar cursos en la universidad, por los que los alumnos que se matriculaban les pagaban) 18 matemáticos, puros o aplicados (es posible en este caso, incluir en esta categoría a algunos físicos o ingenieros con habilidades matemáticas), entre los que se encontraban nombres como los de Hermann Weyl – discípulo de Hilbert, al que sucedió en su cátedra cuando éste se jubiló en 1930 – Arnold Sommerfeld, Constantin Carathéodory, Gustav Herglotz, Max Born, Richard Courant, quien en 1922 fundó en Göttinga el luego famoso Instituto de Matemáticas, que dirigió hasta que tuvo que abandonar Alemania con la llegada de Hitler al poder (emigró a Nueva York donde creó otro Instituto, éste de Matemática aplicada) –, Theodore von Kármán, Otto Blumenthal y Ernst Zermelo. En contraste, entre 1897 y 1901, en Berlín no se habilitó ningún *privatdozent*.

La mayoría de los *privatdozenten* de Göttinga se relacionaron más con Hilbert que con Klein, pero aunque éste se dedicaba sobre todo a aspectos educativos y organizativos, también se relacionó con aquellos. Así, con Arnold Sommerfeld, con el que ya nos encontramos en el capítulo precedente, futuro líder de una magnífica escuela de física en Múnich, preparó una obra extensa (4 tomos, 1897-1912) y singular, *Über die Theorie des Kreisels* (*Sobre la teoría de la peonza*).

En la física los cambios fueron más abruptos que en matemáticas, entre otras razones porque la física experimentó cambios mucho más radicales que la matemática durante un corto periodo. Tales cambios se produjeron especialmente entre 1914 y 1921. A finales de siglo XIX, el panorama de la física en Göttinga estaba dominado por Eduard Riecke (1845-1915) y Woldemar Voigt (1850-1919), que se convirtieron en catedráticos en 1882 el primero, como catedrático de Física



Hermann Minkowski



Felix Klein



Eduard Riecke



David Hilbert



Woldemar Voigt

Gustav Hertz y Walther Gerlach
sirviendo en el ejército durante
la Primera Guerra Mundial
(Jena, 1917)

Experimental, y en 1883 el segundo, ocupando la cátedra de Física Teórica (o Física Matemática, ya que todavía no estaba bien establecida la denominación “Física Teórica”). Aunque compartían algunos intereses, Riecke se centró sobre todo en la estructura corpuscular de la electricidad, los tubos de Geissler y la teoría de la conductividad, mientras que Voigt, probablemente el físico teórico alemán más productivo de la década de 1880, se dedicó a las propiedades de los cristales y la interacción de éstos con la luz. En 1905 las facilidades de que podían disponer mejoraron mucho con la inauguración de un nuevo edificio para el Instituto de Física, que ambos compartían. Riecke debía jubilarse en 1915 y aunque Voigt era cinco años más joven también quería retirarse entonces. En principio la guerra les obligó a cambiar sus planes y seguir en sus puestos, pero en 1915 Riecke murió. Voigt continuó desempeñando su cátedra, pero por entonces ya había entrado en escena otro físico, más joven y muy eminente: el holandés Peter Debye (1884-1966), que en 1936 obtendría el Premio Nobel de Química por sus trabajos sobre estructuras moleculares. Debye era uno de los pocos científicos capacitados tanto en física (y química-física) teórica como experimental, y por ello constituía un candidato ideal para asumir la dirección única del Instituto de Física de Göttingen, algo en lo que estuvieron de acuerdo Riecke y Voigt, y que además contaba con el apoyo del influyente Hilbert, siempre interesado en la física. En septiembre de 1914, Debye, que era catedrático extraordinario en la Universidad de Zúrich desde 1911, aceptó el nombramiento de catedrático ordinario “personal”, adjetivo que debería desaparecer en cuanto las dos direcciones del Instituto de Física se reunieran en una, lo que tuvo lugar en 1916. Entonces Debye contó con la ayuda de Robert Pohl (1884-1976), que ocupaba el puesto de catedrático extraordinario (pasó a catedrático ordinario en 1920).

Sin embargo, Debye no permaneció mucho tiempo en Göttingen. En 1919 la Escuela Politécnica Federal de Zúrich le ofreció una cátedra. Göttingen intentó reaccionar, y pidió ayuda al ministerio argumentando que la pérdida de Debye constituiría una muestra de inferioridad de Prusia frente a Suiza (recordemos que en 1914 fue Göttingen quien consiguió que abandonase la Universidad de Zúrich). Pero las posibilidades de retenerlo eran escasas, habida cuenta de la deteriorada situación sociopolítica y económica que atravesaba Alemania después de la guerra. Y, efectivamente, Debye aceptó la oferta de Zúrich, pero lo que parecía una tragedia para la física en Göttingen resultó ser todo lo contrario porque su sustituto fue, como vimos en el capítulo 1, Max Born, al que se unió, como también se explicó allí, James Franck. Uno encargándose de la física teórica y matemática, y el otro – junto a Pohl – de la experimental. Tres Institutos (Física experimental I, Física experimental II y Física Matemática) ubicados en el mismo edificio. Bajo la dirección, poder de atracción de jóvenes científicos y estímulo de Born y Franck, la física cuántica encontró un hogar poderoso en Göttingen. (Pohl, que se ocupó sobre todo de la enseñanza en los primeros cursos y que escribió algunos textos introductorios a la física, también tuvo, aunque diferente, su círculo de seguidores.)

James Franck

Además de Max Born, James Franck fue otra persona importante en la carrera científica de María Goeppert, por lo que es obligado referirse a él.

Franck formaba parte de una familia de banqueros judíos, y a instancias de ésta comenzó a estudiar derecho y economía en Heidelberg, pero pronto sus intereses se decantaron por las ciencias naturales, asistiendo a clases de geología y química al mismo tiempo que a las de derecho. En 1902 conoció a Max Born, que entonces era un joven estudiante como él, con el que le uniría una amistad durante toda su vida, y que le convenció para estudiar física. Abandonó entonces Heidelberg por la Universidad de Berlín donde recibió su doctorado en 1906 y completó su habilitación (que le facultaba como *privatdozent*) en 1911. En Berlín realizó junto a Gustav Hertz, en 1914, uno de los experimentos cruciales de lo que se puede denominar la “primera etapa” de la física cuántica. Sus investigaciones se centraron en la interacción entre electrones y átomos de un gas de mercurio contenido en un tubo. Los electrones en cuestión procedían de un hilo metálico caliente y eran acelerados por un campo eléctrico, lo que permitía medir su energía. De esta manera lograron demostrar que los átomos de mercurio solo podían absorber cantidades determinadas de energía en buena correspondencia con los cuantos de luz de Planck-Einstein. Confirmaban así la estructura del modelo atómico de Bohr. Por ese trabajo Franck y Hertz recibieron el Premio Nobel de Física de 1925.

Como la de otros científicos – Born entre ellos – la guerra interrumpió las investigaciones de Franck (se alistó como voluntario), pero no permaneció mucho tiempo en el ejército, ya que pronto regresó del frente ruso seriamente enfermo de disentería. Reanudó su carrera científica en febrero de 1916 al conseguir un puesto de profesor en la Universidad de Berlín. Pero cuando Fritz Haber comenzó a preparar gases tóxicos en el Instituto de Químico-Física de la Asociación Kaiser Wilhelm (Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft) para emplearlos en la guerra, Franck, al igual que otros científicos notables como Otto Hahn, Gustav Hertz y Hans Geiger, fue comisionado para someter a prueba las máscaras de gas y los tipos de filtro. Tres días antes de la abdicación del káiser Wilhelm, el 28 de noviembre de 1918, Franck recibió la baja del ejército.

Como el Tratado de Versalles prohibió que Alemania desarrollase nuevo armamento, Haber decidió reorganizar completamente el Instituto de Químico-Física y Electroquímica, creando algunas divisiones nuevas. Una de ellas estaba dedicada a la investigación de la ionización y excitación de átomos y moléculas y en enero de 1919 Franck fue nombrado su director con un contrato por cinco años. Pero como vimos, no estuvo allí mucho tiempo porque en 1921 se unió a Born en Göttingen.

Entre las características de Franck, había dos que destacaban. Por un lado su extraordinaria habilidad, su método personal como físico experimental. Peter Pringsheim, experto en luminiscencia (fluorescencia y fosforescencia) que conocía a Franck de su época de Berlín, se refirió a esa faceta suya en los términos

siguientes: “Cuando tiene a la vista de manera firme un problema, piensa en él incesantemente. Tienes la impresión de que incluso sueña con él. Le gusta discutirlo con sus estudiantes, con sus colegas, con todo el mundo, pero no tanto para convencerlos sino para entenderlo él de manera más clara. Y entonces encuentra una solución, que parece tan simple una vez que la ha formulado, que uno se pregunta cómo no había estado siempre tan clara para cualquiera.” La segunda característica era su accesibilidad. En palabras de uno de sus doctorandos, Heinz Maier-Leibnitz: “James Franck organizaba bien su día: siempre encontraba tiempo para conversaciones; su interés en cualquier humano era absolutamente sorprendente [...]. Franck era la fuente del buen ambiente del Instituto.”

En el mismo sentido, pero ofreciendo más detalles, Víctor Weisskopf (1908-2002), el físico austriaco que desarrolló una brillante carrera, primero en Alemania y después y mucho más prologada en Estados Unidos (también llegó a ser director general del CERN, el laboratorio europeo de física de altas energías ubicado en Ginebra), recordó en sus memorias el ambiente que reinaba en Göttingen en aquella época, así como la personalidad de algunos de sus principales protagonistas, Born y Franck en particular:

“Cuando llegué a Göttingen en 1928, encontré que mientras el régimen era mucho menos estricto que en Múnich [donde había estudiado con Sommerfeld], tenía otras ventajas. El profesor de física teórica de más alto rango era Max Born, uno de los principales contribuyentes al desarrollo de la mecánica cuántica. Se mantenía algo distante de sus estudiantes y tenía un enfoque bastante formal de la física. Cuando daba clases, tendía a expresar todo en términos matemáticos complejos. Aunque yo prefería un enfoque menos formal, su presencia me deslumbraba. Sabía que, a pesar de todas nuestras diferencias, era un gran hombre. Quería emularlo. De hecho, era muy amigable y me animaba. Pero cuando entré en contacto con la nueva mecánica cuántica, pensé que era una teoría esotérica muy alejada de la experiencia humana ordinaria. Yo todavía era muy joven e idealista, y mi dedicación a los asuntos humanos y sociales se había convertido en muy importante para mí [...].

A pesar de varios encuentros positivos con Born, mi colaboración con él no fue tan estrecha como había esperado. Él era, por naturaleza, un hombre poco dado a abrirse a los demás en circunstancias normales. Poco después de mi llegada a Göttingen, había sufrido un infarto y era todavía más difícil acercarse a él. Aun así tuvimos algún contacto. Born me llamó a su despacho y me dijo que estaba preparando un libro de texto sobre óptica. Sabía que yo había estado interesado en el comportamiento de la luz en cristales. Dijo que no había pensado todavía en el capítulo sobre ese tema y que necesitaba mi ayuda. Yo debía leer la literatura y preparar una sinopsis de lo que pensaba debería ser el capítulo. Lo escribí, pero el resultado fue tan diferente al estilo de Born que no podía incluirlo en el libro sin hacer muchos cambios. Cuando se publicó el libro [*Optik: Ein*

Lehrbuch der elektromagnetischen Lichttheorie, 1933)] fui incapaz de reconocer el capítulo como algo que había escrito.

Los dos profesores seniors de física experimental eran James Franck y Robert Pohl. Me atrajo especialmente Franck, que había ganado el Premio Nobel en 1925 por demostrar que cuando los átomos colisionan ganan o pierden energía en saltos cuánticos. Al contrario que el solitario Born, Franck era cálido e interaccionaba de forma muy personal y amigable con sus estudiantes, que estaban muy impresionados con él. También tenía un grupo de activos jóvenes ayudantes, que nos resultaban muy accesibles y que eran profundamente devotos de su jefe. Constituía un gran placer discutir física con Franck. Me impresionaba su intuitiva comprensión de la ciencia, su misterioso sentido de la física y su maravillosa forma de trabajar. Parecía ser capaz de predecir con gran precisión el resultado de un experimento o de cálculos teóricos, incluso aunque no estuviese muy familiarizado con los métodos matemáticos implicados. Debido a esto decíamos que tenía un contacto directo con Dios [...].

Además de los ‘grandes hombres’ había en Göttingen muchos jóvenes en el nivel que en Estados Unidos se denomina profesores ayudantes. Aprendimos bastante de los miembros junior de la Facultad, porque eran mucho más accesibles y nos relacionábamos con ellos socialmente. Recuerdo en particular a Walter Heitler, Lothar Nordheim y Gerhard Herzberg, quien después se instaló en Canadá y ganó el Premio Nobel por su trabajo en física molecular. Herzberg enseñaba un curso denominado ‘Introducción a la mecánica cuántica’. Este campo era entonces tan nuevo que todavía no formaba parte de la mayoría de los programas de estudio de física, pero Herzberg era joven y estaba ansioso de enseñar los últimos desarrollos. Para mí, el curso de Herzberg significó muchísimo, porque me ayudó enormemente a familiarizarme con la nueva física.”

Con Born, Franck y Pohl, además de los jóvenes que se congregaron a su alrededor, la física en Göttingen floreció. En el semestre de verano de 1932, por ejemplo, 206 de los 3.662 estudiantes de la Universidad de Göttingen, esto es el 5,6 %, estudiaba física, mientras que en toda Alemania eran 2.299 los alumnos de física, de un total de 126.381 universitarios, por consiguiente, el 1,8 %.

Fue en esa prestigiosa y revitalizada universidad donde María Goeppert comenzó, en 1923, a estudiar física. Pero antes de ocuparme de su etapa universitaria quiero considerar brevemente la situación que encontraban las mujeres para acceder a la educación superior, en general y en Alemania en particular.

La emancipación de la mujer

La emancipación de la mujer, la igualdad completa de derechos entre los dos sexos, son temas recurrentes que adquirieron intensidad a partir del siglo XIX, intensidad que – con sobradas razones – no ha decaído todavía. La situación había

La emancipación de la mujer, la igualdad completa de derechos entre los dos sexos, son temas recurrentes que adquirieron intensidad a partir del siglo XIX, intensidad que – con sobradas razones – no ha decaído todavía.

surgido mucho antes. Así, algunos de los pensadores de la Ilustración fijaron su atención en el papel de la mujer en la sociedad. Tal es el caso de Theodor Gottlieb von Hippel (1741-1796), un miembro muy influyente de la sociedad de Königsberg (ciudad de la que llegó a ser alcalde; desde 1945 su nombre es Kaliningrado), quien publicó en 1793 un libro, *Über die bürgerliche Verbesserung der Weiber* (*Sobre la mejora civil de la mujer*), en el que mantenía que el talento de la mujer era igual al del hombre, residiendo la muy notable diferencia observada entre las aportaciones de ambos sexos en el hecho de que la inteligencia y cultura de las mujeres habían sido descuidadas, si no deliberadamente reprimidas. En el alba de la Revolución Francesa, Jean Antoine Marie Nicolas Caritat (1743-1794), marqués de Condorcet, defendió con vigorosos argumentos los derechos de las mujeres. Si los derechos son naturales, sostenía, no se les puede negar a quienes participan de igual naturaleza, nada más y nada menos que a la mitad del género humano. “O ningún individuo de la especie humana tiene verdaderos derechos, o todos tienen los mismos”, escribía en un ensayo titulado *Sur l’admission des femmes au droit de cité* (*Sobre la admisión de las mujeres al derecho de ciudadanía*, 1790). Y añadía: “Rechazar los derechos políticos de la mujer nos llevaría al contrasentido de admitir mujeres en la jefatura del Estado y no en las urnas o en una función pública de carácter electivo (porque los derechos políticos de la mujer deben incluir, desde luego, el sufragio pasivo). De otro modo, oponerse a la incorporación de la mujer a los derechos políticos por el temor de que la vida pública la aparte de la familia y del hogar nos llevaría a excluir a todos los que tienen una ocupación útil por el mismo motivo: los trabajadores, los artesanos, etc..., con lo que la Asamblea Nacional representaría sólo a una aristocracia adinerada y desocupada. Y decir que no pueden cumplir funciones públicas porque están expuestas a embarazos y a indisposiciones pasajeras comportaría excluir de las mismas a los hombres que se resfrían frecuentemente y a los que padecen gota en el invierno”.

Sin embargo, finalmente la Revolución Francesa, aquel hermoso y decisivo movimiento para la historia posterior de la humanidad, el del lema “Libertad, Igualdad y Fraternidad”, no hizo honor a sus principios en lo que a las mujeres se refiere. Von Hippel, por ejemplo, pensaba que ésta no había aportado nada a la igualdad de las mujeres: “¿Cómo pudo un pueblo que existe por y para el bello sexo dejar de lado a todo un género en la mundialmente celebrada Igualdad? [...] La nueva constitución merece que repita mis reproches, porque da por bueno el

no considerar a toda una mitad de la nación [...]. Todos los seres humanos tienen los mismos derechos. Todos los franceses hombres y mujeres deben ser libres y ciudadanos”.

El liberalismo del siglo XIX, menos llamativo sin duda que la brillante y dramática Revolución Francesa, pero más efectivo a la larga en lo que se refiere a la orientación que tomó la vida social de algunas de las sociedades más avanzadas, incidió de forma importante en la cuestión feminista. La declaración clásica de la aplicación del credo liberal a las mujeres fue formulada por el que acaso sea su teórico más señalado: John Stuart Mill (1806-1873). Su ensayo, *The Subjection of Women* (*El sometimiento de las mujeres*), escrito en 1861 y publicado en 1869, fue la biblia de las feministas. Los párrafos iniciales del libro de Mill resonarían durante mucho tiempo en sus oídos:

“El propósito de este ensayo es explicar, tan claramente como sea capaz, los fundamentos de una opinión que he mantenido desde la muy temprana época en que formé todas mis ideas sobre asuntos sociales o políticos, y que, en lugar de haberse debilitado o modificado, ha ido haciéndose más fuerte con la reflexión y la experiencia que da la vida: Que el principio que regula las relaciones sociales existentes entre los dos sexos – la subordinación legal de un sexo al otro – es errónea en sí misma, y ahora uno de los principales obstáculos a la mejora humana; y que debe ser reemplazado por un principio de perfecta igualdad, que no admita ningún poder o privilegio para una de las partes, ni indefensión en la otra”.

Naturalmente, la obtención de mayores derechos para las mujeres varió de una nación a otra. Veamos lo que sucedió en Alemania, la patria de María Goeppert.

El acceso a la educación de las mujeres en Alemania

Aunque la clase media germana era amplia, en la práctica a partir de la década de 1871, el año de la unificación de Alemania bajo el liderazgo de Otto von Bismarck, se mostró satisfecha con el ya más sólido imperio alemán en el que el poder se encontraba en manos de la aristocracia militar, la reducida élite de los grandes industriales y el emperador. Las reclamaciones progresistas de la revolución de 1848 se habían ido disolviendo hasta casi desaparecer. Una muestra de que sucedió así se encuentra, precisamente, en el movimiento feminista. En 1848 Louise Otto-Peters (1819-1895), que llegó a encabezar una Allgemeiner Deutscher Frauenverein (Asociación General de Mujeres Alemanas), había reclamado públicamente la igualdad entre los dos sexos, incluyendo el voto para la mujer. En 1865 aquella Asociación pedía la plena igualdad en materia de enseñanza, incluyendo la admisión de niñas en las escuelas primarias de niños (lo que era considerado inmoral por las autoridades). Diez años más tarde, únicamente solicitaba una educación adecuada de la mujer para la maternidad. Un feminismo

más exigente sólo apareció en Alemania a comienzos del siglo xx, siendo uno de sus principales objetivos la obtención del sufragio para las mujeres.

En lo que a la educación superior se refiere, hasta poco antes del comienzo de la Primera Guerra Mundial no comenzaron a aparecer con regularidad en las universidades alemanas algunas estudiantes. Durante años las mujeres sólo pudieron acceder a la universidad mediante algún permiso especial, que dependía sobre todo del gusto del *Herr Professor*. Prusia, el principal Estado del Imperio, sólo decidió admitir mujeres en sus universidades en 1908. El año anterior el número de mujeres en universidades no prusianas fue de poco más de 300, pero una vez que Prusia levantó su veto los números crecieron rápidamente: en 1909 ya había 1.400 en las universidades germanas; 2.500 en 1911 y 8.300 en 1921.

Tampoco ayudaba a la mejora de la situación el escaso número de escuelas para chicas que preparasen a sus alumnas para poder enfrentarse a los exámenes de admisión en una universidad (el equivalente a los *Gymnasium* que existían para chicos). El 18 de agosto de 1908 también se aprobó en Prusia una ley para “la reforma de las escuelas secundarias para mujeres” con el que se establecía un programa de estudios de diez años, pero todavía desarrollado al margen de los estudios que seguían los hombres. A partir del séptimo u octavo curso, las muchachas tenían la opción de pasar a uno de los denominados *Studiennanstalt* (institutos de estudios superiores), desde el cual – habrían pasado trece años de cursos – podían presentarse al examen, el *Abitur*, necesario para entrar en la Universidad. En 1909, de las 309 escuelas para muchachas que existían en Prusia, únicamente 22 ofrecían esta opción; en 1910 eran 27 y en 1911, 33. Además, inicialmente, las mujeres no tenían acceso a todas las Facultades universitarias; en 1911 sólo podían obtener grados en las mismas condiciones que los hombres en las Facultades de Derecho, Medicina y Filosofía; no así, por ejemplo, en las Facultades de Teología. Tomando en consideración todas las instituciones de nivel universitario, el número era de 8.600 en 1926 y de 21.200 en 1931, lo que implica que la década de los 20 fue decisiva para la incorporación de las mujeres al mundo universitario alemán.

Con respecto a la Habilitación, el trabajo y examen que permitía enseñar en la universidad, y admisión en la categoría de *dozent*, en Prusia las mujeres solo pudieron acceder a ellos a partir de 1920. En otros *Länder* adquirieron estos derechos en 1918 y 1919. Entre las primeras mujeres que se beneficiaron de estos derechos figuran la física Lisa Meitner y la matemática Emmy Noether.

Cuando los nazis llegaron al poder, tomaron como uno de sus objetivos el organizar las escuelas y universidades. Por primera y única vez en su historia Alemania tuvo un sistema educativo administrativamente centralizado. Uno de los puntos de su programa fue el de intentar limitar el porcentaje de mujeres al 10% del total de la población estudiantil. En 1926, el 9% de los estudiantes universitarios alemanes eran mujeres; en 1931 había ascendido al 16%. En 1938 bajó al 11%, para volver a subir al 16% en 1951 y al 22% en 1960.

Científicas en Gotinga

No obstante las dificultades que las mujeres encontraban para acceder a una educación superior, algunas dejaron su huella en la física y la matemática. Más adelante, en otro capítulo, aparecerá la austriaca Lise Meitner, que desarrolló su carrera en Berlín hasta que, debido a sus raíces judías, tuvo que abandonar Alemania cuando ésta se anexionó Austria. Austriaca también fue Marietta Blau, especialista notable en desarrollar técnicas fotográficas (emulsiones) para estudiar fenómenos radiactivos y rayos cósmicos (Schrödinger y Hans Thirring llegaron a proponerla para el Premio Nobel de Física), cuya biografía – como la de Hertha Sponer, Charlotte Riefenstahl-Hourtemans y Emmy Noether – fue terriblemente complicada. Salvo en el caso de Blau, que sólo estuvo un año en Gotinga, todas formaron parte del “círculo de Gotinga”. Por ello y porque mostraron su valía como científicas, es apropiado recordarlas.

MARIETTA BLAU

Marietta Blau (1894-1970) estudió Física en su ciudad natal, Viena, en cuya universidad se matriculó en 1914. Su tesis doctoral, que estuvo dedicada a un tema radiológico, la absorción de rayos gamma, la juzgaron en marzo de 1919 dos de los físicos más destacados de la Viena de entonces, Franz Exner y Stefan Meyer. En la segunda mitad de 1921 – después de haber sufrido una seria enfermedad – entró a trabajar como física en la fábrica de tubos de rayos X Fürstenau, Eppens & Co. de Berlín, compañía que dejó en enero de 1922 para trabajar en el Instituto de las Bases Físicas de la Medicina de Fráncfort. Posteriormente se incorporó al famoso Instituto del Radio de la Academia de Ciencias Austriaca, en Viena, dirigido por Stefan Meyer. No era la única mujer que investigaba en aquel centro, otras científicas eran Elisabeth Rona, Hertha Wambacher y Berta Karlik (algunas – Bau entre ellas – formaban parte de la Verband der Akademikerinnen Österreichs, Asociación Austriaca de Mujeres Universitarias). Permaneció en el Instituto del Radio hasta 1938, aunque el año académico 1932-1933 lo pasó casi por completo, financiada por la Verband, en Gotinga, colaborando con Robert Pohl en física de cristales. En una carta que escribió a Berta Karlik el 22 de octubre de 1932, se refería a Pohl y a la burocracia de Gotinga en los términos siguientes: “El sistema burocrático aquí es terrorífico; una persona diferente está a cargo de cada pequeña bagatela. Mañana tendré – con el corazón palpitando – mi primera reunión con Pohl. Si estás acostumbrada a los amistosos saludos de Meyer por la mañana, no puedes dejar de considerar los monárquicos cabeceos de Pohl bastante extraños. Me gustaría establecer contacto con Franck y Born, pero no sé cómo hacerlo.”

Después de Gotinga, en abril de 1933, viajó a París para trabajar unos meses en el Instituto del Radio dirigido por Marie Curie, continuando las investigaciones sobre la emisión de neutrones inducida por partículas alfa en el berilio que había iniciado en Viena. Su intención era regresar a Gotinga, pero la situación política en

Alemania – la llegada de Hitler al poder el 30 de enero de 1933 y el casi inmediato comienzo de la represión de los judíos – le hizo cambiar de opinión y regresar a Viena. Fue en aquel período, en 1937, cuando junto a Hertha Wambacher realizó su descubrimiento más importante, las denominadas “estrellas de desintegración” (*Zertrimmerungssterne*) que detectaron en placas fotográficas expuestas a la radiación de rayos cósmicos en el Observatorio de Hafelekar, ubicado a una altitud de 2.300 metros. Las “estrellas” en cuestión eran los trazos resultantes de las reacciones nucleares de los rayos cósmicos con los núcleos de la emulsión fotográfica, y servían para identificar las partículas elementales que intervenían. Pero el 13 de marzo de 1938 la plaga antijudía llegó a Austria con la “Anexión” (*Anschluss*), aprobada en plebiscito, no lo olvidemos, el 10 de abril, por el 99,73 por ciento de los votantes austriacos. Y esto agregó alrededor de 200.000 judíos más al imperio nazi.

Marietta Blau abandonó Viena un día antes del *Anschluss*. Desde Oslo, donde se instaló, escribía el 21 de marzo a su colega el físico vienés Friedrich Paneth, que se encontraba pronunciando unas conferencias en Inglaterra cuando tuvo lugar la Anexión y decidió entonces no regresar a Austria (se instaló en el *Imperial College* de Londres): “Dejé Viena el 12 de marzo [1938] a la siete de la tarde y no tenía claro realmente cuál era la situación política. Debería haberme marchado al comienzo de marzo pero pospuse mi partida varias veces y tal vez fui el último austriaco que atravesó la frontera alemana. En Viena no supimos lo que iba a pasar hasta el último momento y únicamente me di cuenta de que toda esperanza había desaparecido cuando durante mi viaje encontré tropas alemanas”.

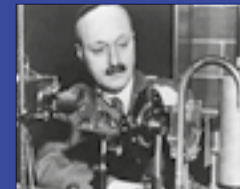
En Oslo su posición era precaria, de manera que con la recomendación de Einstein obtuvo un puesto en la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del Instituto Politécnico Nacional de la ciudad de México, a donde llegó en noviembre de 1938. Allí las condiciones para la investigación eran escasas o inexistentes, pero aun así en los cinco años que permaneció en México publicó siete artículos. Finalmente, en 1944 obtuvo permiso para emigrar a Estados Unidos. En mayo de ese año llegó a Nueva York y consiguió un empleo en el departamento de investigación de la industria International Rare Metals Refinery Inc., donde estuvo dos años, puesto que a partir de 1947 y debido a la fusión de la compañía con Gibbs Manufacturing and Research Corporation, que no tenía su sede en Manhattan sino en Janesville, una ciudad de 25.000 habitantes en Wisconsin, tuvo que abandonar Nueva York, un traslado del que en absoluto disfrutó. Para su fortuna, el 1 de enero de 1948 se incorporó a la Universidad de Columbia (Nueva York) con un contrato de dos años. Allí era la única mujer científica y su trabajo consistía en la investigación y mejora de las emulsiones fotográficas para su aplicación en el estudio de partículas elementales. Cuando expiró su contrato en Columbia, pasó al Brookhaven National Laboratory de la Atomic Energy Commission, donde por fin dispuso de material más avanzado. Sin embargo, tampoco encontró allí satisfacción y en 1956 se incorporó a la Universidad de Miami. Finalmente, en la primavera de 1960 regresó a Viena y a su añorado Instituto del Radio poniendo así



Louise Otto Peters



Emmy Noether



Fritz Houtermans y Charlotte Riefensthal

Hertha Sponer en su laboratorio.
Arriba, James Franck

Marietta Blau

fin a su vida de científica-peregrina. Falleció el 27 de enero de 1970. En 1962 la Academia Austriaca de Ciencias le otorgó el Premio Schrödinger.

HERTHA SPONER

Hertha Sponer (1895-1968), cuyos padres eran protestantes, sí perteneció propiamente al “círculo de Gotinga”, y como la mayoría de los principales protagonistas de este capítulo terminó instalándose en Estados Unidos. Además, después de que James Franck enviudase – ya en América – Sponer, que había sido su ayudante y amiga íntima de la familia Franck, contrajo matrimonio con este.

En un currículum vitae que preparó en 1920 para las formalidades asociadas a la defensa de su tesis doctoral, Sponer resumió los estudios que había realizado hasta entonces: “Desde la Pascua de Resurrección de 1901 hasta Pentecostés de 1907 asistí a escuelas en Neisse y Zittau. Luego recibí clases particulares en el internado de Zittau hasta la Pascua de 1910. Desde el otoño de 1910 hasta la Pascua de 1912, seguí los cursos preparatorios para mujeres de la señora Strinz, en Berlín, para entrar en el decimoprimer nivel de la Escuela Secundaria (*Realschule*), que dejé después de tres meses. Asistí entonces a escuelas de institutrices en Hanover y Heidelberg y me examiné en 1913, habiendo estado empleada como institutriz los dos años siguientes. Durante la guerra, desde noviembre de 1915 hasta julio de 1916, acepté un puesto de maestra sustituta en una escuela elemental”.

Fue entonces, en 1916, en medio del caos de la guerra, cuando Hertha abandonó el empleo de sustituta y se trasladó a un instituto de Breslau para preparar el *Abitur*. No era un instituto solo para chicas; de hecho, solamente tenía otra compañera. Y aprobó el examen: fue una de las 570 muchachas que en marzo de 1917 superaron en Prusia el *Abitur*.

En cuanto a qué carrera elegir, lo tenía claro: física, y escogió la Universidad de Tubinga, una de las primeras universidades alemanas en aceptar mujeres (aunque una ley estatal lo permitía desde 1904, sólo se implementó en 1907; con anterioridad –únicamente podían asistir como “oyentes invitados”). En Tubinga dominaban los cursos de matemáticas; no había ninguno de física teórica pero sí de física experimental, a cargo de Friedrich Paschen, de cuyas enseñanzas Sponer se benefició. No obstante, como esa enseñanza sólo se impartía durante el primer curso, y ante la ausencia de física teórica, después de ese primer año Hertha se trasladó a la Universidad de Gotinga, donde la proporción de mujeres estudiantes era algo menor que en el resto de Alemania: en 1923, el 9,4 % frente al 10,2 %. Allí, a partir del curso 1918-1919, pudo beneficiarse de las enseñanzas de Peter Debye, Robert Pohl (un conocido oponente a que las mujeres estudiaran en la universidad) y Woldemar Voigt. Después de cuatro semestres en Gotinga, Sponer se graduó con una disertación titulada *Über ultrarote Absorption zweiatomiger Gase* (*Sobre la absorción infrarroja de gases diatómicos*) dirigida por Debye, quien poco después dejó Gotinga por Zúrich.

Con su disertación aprobada, en marzo de 1920 Sponer se trasladó a Berlín, una ciudad en la que se sentían perfectamente las turbulencias de la República de Weimar. Allí trabajó hasta la primavera de 1921, los primeros meses en el Instituto de Químico-Física, que dirigía Fritz Haber en la Asociación Kaiser Wilhelm, y a partir de octubre en el Instituto de Física de la Universidad; tanto en un lugar como en el otro sin recibir salario alguno. Y en este Instituto conoció a James Franck, el científico, el hombre, al que estaría vinculada la mayor parte del resto de su vida, primero como colega y mucho más tarde, como señalé, como esposa.

En Berlín se dedicó a estudiar problemas relativos a colisiones de electrones, asunto sobre el que versó su primera publicación, que apareció en el *Zeitschrift für Physik*: “Sobre la frecuencia de las colisiones inelásticas de electrones con átomos de mercurio”, un trabajo relacionado con el que Franck y Hertz habían realizado en 1914. De hecho, en la introducción del artículo Sponer escribía: “A sugerencia del profesor Franck, en ese estudio se ha determinado la producción de colisiones inelásticas y, dentro de lo posible, su dependencia con la velocidad de los electrones”. La familiaridad que Hertha adquirió con Franck se resume bien en una fotografía tomada durante la despedida que se hizo a Franck cuando este decidió dejar Berlín por Gotinga. En ella aparecen (de izquierda a derecha): sentados, Hertha Sponer, Albert Einstein, Ingrid Franck (esposa de James), Lise Meitner, Fritz Haber y Otto Hahn; de pie, Walter Grotian, Wilhelm Westphal, Otto von Baeyer, Peter Pringsheim y Gustav Hertz.

Una de las concesiones que se hicieron a Franck para que aceptara instalarse (en noviembre de 1920) en Gotinga fue disponer de dos ayudantes. Uno de esos puestos fue para Hertha Sponer. Inicialmente su empleo era temporal, pero en octubre de 1921 se convirtió en estable, aunque debía ser renovado cada dos años. Su función principal era encargarse de la enseñanza experimental en los laboratorios. Y parece que era bastante estricta. En sus memorias, Victor Weisskopf se refirió a esto: “Un pequeño incidente pudo haber sido decisivo [en decantarse por la física teórica y no la experimental]. Me apunté al curso de laboratorio en el que se suponía que los estudiantes debíamos efectuar experimentos. Mi supervisor inmediato era Hertha Sponer, una mujer bastante abrasiva. Un día tuve la desgracia de romper una parte importante de un instrumento, y la señorita Sponer dijo: ‘Usted nunca llegará a ser un experimentalista.’ Aunque su juicio fue algo apresurado, acepté entonces su opinión, y su predicción resultó cierta”.

En lo que se refiere a su investigación, Sponer continuó en el campo en el que se había iniciado en Berlín. Después del citado primer artículo, hasta 1933 publicó otros 25 más, solo dos de ellos junto a Franck, el segundo de estos (1932) con otro físico famoso, Edward Teller, que como veremos fue un gran amigo de María Goeppert Mayer. El campo que cultivó fue sobre todo el de la física molecular.

En octubre de 1922, pasó la Habilitación, esto es, la *venia legendi*, algo que solo se permitía a las mujeres desde 1919; entre 1908 y 1933, 10.595 mujeres

obtuvieron un doctorado en Alemania, de ellas solo 54 consiguieron la Habilitación (14 en medicina, matemáticas y ciencias naturales), y de éstas únicamente 24 llegaron a lograr el título de profesor, aunque en el grado superior, el de *ordinarius* (equivalente a catedrático) y directora de un instituto solo dos, la botánica Margarethe von Wrangell y la socióloga Mathilde Vaerting. Una de las 22 restantes fue Hertha Sponer (recibió el nombramiento en enero de 1932); este puesto solía depender, para su mantenimiento, de la voluntad del *Herr Professor*.

En 1925 obtuvo una beca de la Fundación Rockefeller que le permitió pasar el curso 1925-1926 en el Departamento de Física de la Universidad de California, en Berkeley, donde colaboró con Raymond T. Birge, con quien publicó un artículo en la principal revista de física de Estados Unidos, *Physical Review*: “El calor de disociación de moléculas no polares” (1926).

De regreso a Gotinga se convirtió en ayudante principal el 1 de octubre de 1930, puesto que debería mantener los siguientes cinco años. Pero dos años más tarde, el 26 de octubre de 1932, fue nombrada profesora asociada (*ausserordentlicher professor*), la segunda mujer con un nombramiento de *professor* en la República de Weimar – la primera fue Lise Meitner en Berlín –, aunque no en el nivel superior de catedrática (entonces ninguna mujer ocupaba semejante puesto en Prusia).

En Gotinga, Sponer permaneció hasta el fatídico año de 1933, cuando con la ayuda de los partidos conservadores, el 30 de enero, Hitler consiguió formar Gobierno. No tardó mucho Hitler – dos meses, nada más – en comenzar a implementar su ideología racial. El 31 de marzo, jueces judíos fueron apartados de sus funciones en Prusia, específicamente por ser judíos. Una semana después, el 7 de abril, se promulgaba la ominosa “Ley de restauración de la carrera del funcionario” (*Gesetz zur Wiederherstellung des Berufsbeamtentums*), con la que de hecho se pretendía purgar todas las escalas de funcionarios, profesores universitarios incluidos, por supuesto.

En otras palabras, esta ley implicaba que los funcionarios que habían conseguido su puesto durante la República de Weimar, que no fuesen de ascendencia aria, o cuyas actividades políticas no garantizaran que servirían sin reservas al nuevo régimen, tenían que abandonar sus puestos. En teoría, los no-arios que habían obtenido sus puestos antes del comienzo de la Primera Guerra Mundial, que habían luchado en el frente durante aquella guerra, o cuyos padres o hijos habían fallecido en acto de servicio en la guerra, podían conservar sus empleos. En la práctica, sin embargo, también estas personas perdieron sus puestos con bastante rapidez. (En cualquier caso, el 15 de septiembre de 1935 se eliminaban esas excepciones teóricas. Aquel día se promulgaron los decretos conocidos como “leyes de Nüremberg”. Estas leyes, calificadas oficialmente como de “nacionalidad”, establecían que los judíos eran súbditos carentes de derechos.)

Ante la noticia, muchos alemanes de origen judío debieron reaccionar igual que lo hizo Víctor Klemperer, veterano de la Gran Guerra, un hombre de letras y un historiador refinado, que el 10 de abril anotaba en su diario (*Ich will Zeugnis ablegen bis zum letzten. Tagebücher 1933–1945*; 1995): “El desgraciado sentimiento de ‘Gracias a Dios, estoy vivo’. La nueva ‘ley’ del Servicio Civil me deja, como veterano de guerra, en mi puesto, al menos por el momento [...]. Pero por todas partes hay tumultos, miseria, miedo y temblores”.

Algunos no fueron tan temerosos o “prudentes”. El primer científico en reaccionar abiertamente ante la afrenta que sin duda representaba las nuevas regulaciones fue James Franck. Diez días después del decreto, el 17 de abril de 1933, enviaba su dimisión al ministro prusiano de Ciencias, Artes y Cultura. De hecho, podía haberse acogido a las excepciones que incluía la ley, ya que, como señalé, había servido a su país durante la Gran Guerra. En su número del 18 de abril, el periódico *Göttinger Zeitung* daba la noticia incluyendo una entrevista con Frank y algunos pasajes de la carta que envió al ministro con su dimisión:

“He solicitado a mi superior que se me permita abandonar mi puesto. Intentaré continuar trabajando en ciencia en Alemania.

Nosotros, los alemanes de origen judío estamos siendo tratados como extranjeros y como enemigos de la patria. Se espera que nuestros hijos crezcan sabiendo que no se les permitirá nunca demostrar que son buenos alemanes.

A todos aquellos que han estado en la guerra se les permite continuar sirviendo al Estado. Declino beneficiarme de este privilegio, a pesar de que comprendo la postura de aquellos que consideran hoy su deber permanecer en sus puestos”.

Hertha Sponer no era judía, y podía haber permanecido en Gotinga. Y de entrada lo hizo, pero ya no tenía la protección de Franck sino que dependía de Pohl, contrario como apunté a la presencia de mujeres en la ciencia. Además, la ideología nazi no era favorable a que las mujeres participaran en actividades supuestamente masculinas. Era solo cuestión de tiempo que decidiera abandonar Alemania. Y, efectivamente, en septiembre de 1934 se trasladó a Oslo (como hizo Blau), aunque con un permiso oficial de ausencia de Gotinga. En Oslo se le había prometido que tendría unas facilidades para continuar investigando que no se plasmaron en la medida en que ella deseaba. En el verano de 1935 visitó Gotinga, y desde allí escribió a Ingrid, la esposa de Franck: “Gotinga continúa deshaciéndose. En todos los restaurantes y cafés se ven señales de que los judíos no son bienvenidos [...]. He oído que incluso ya hay una señal en la estación de ferrocarril”.

Un detalle interesante es que a finales de 1934, viajó a España invitada por un tal “profesor Baberas” (que no he podido identificar) de la Facultad de Ciencias de Madrid. Allí dio una serie de conferencias, y luego pasó una semana en Navidades visitando Córdoba, Sevilla y Granada. En el volumen 33 (1935) de los

Anales de la Sociedad Española de Física y Química apareció un artículo suyo: “Los espectros de las moléculas y su aplicación a los problemas químicos”.

Mientras sucedía todo esto, Franck y su familia (que terminó incluyendo a la de su hija y yerno, el físico ario Arthur Robert von Hippel, antiguo discípulo de Franck en Gotinga) se habían instalado en Copenhague, en el Instituto de Física dirigido por Niels Bohr. Pero como otros físicos terminó, terminaron, dirigiéndose a Estados Unidos: aceptó la oferta – que le llegó a través de Karl Herzfeld – de una cátedra en la Universidad Johns Hopkins, en Baltimore (Maryland). Entre las razones que le movieron a dar tal paso se encontraban las económicas, como reconoció en una carta a Max Born del 29 de octubre de 1934: “Aparte de por los chicos, existe la posibilidad de tener en mis manos más dinero, estimo que alrededor de 6.000 dólares, de manera que podré contratar una póliza de seguro de vida, algo que es cada vez más y más importante dada mi edad”. El hecho es que se incorporó a Johns Hopkins en 1935. Antes de viajar allí (tomó un barco en junio), visitó a su madre y hermana en Berlín, y aprovechó para despedirse de Max Planck, a quien invitó a que fuera a pasar unos días con él en Copenhague, antes de abandonar Europa. La respuesta que parece le dio Planck, el más respetado de los físicos alemanes, un fiel servidor de su patria, fue conmovedora: “No, no puedo viajar al extranjero. En mis viajes anteriores sentí que era un representante de la ciencia alemana y estaba orgulloso de ello. Ahora tendría que ocultar mi cara de vergüenza”.

La vergüenza que mencionaba Planck tuvo muchas caras. Evidentemente, una, la principal, las tragedias humanas que provocó, pero hubo otras simbólicas que reflejaban también el *zeitgeist*, el espíritu de aquel tiempo. Una de estas tuvo lugar cuando en el verano de 1937 se celebró el bicentenario de la fundación de la Universidad de Gotinga, en la conferencia que pronunció el rector Friedrich Neumann (nombrado por el Gobierno alemán; esto es, por Hitler) no mencionó en ningún momento a Born, Courant o Franck, ni siquiera al siempre independiente Hilbert; únicamente hizo referencia a los arios Gauss, Weber y Felix Klein.

Su colega y amigo, igualmente de origen judío, Max Born también abandonó Gotinga. Lo hizo antes de que las autoridades nazis le obligaran. El 10 de mayo de 1933 abandonaba Gotinga en compañía de su esposa, Hedi, y su hijo de doce años Gustav (su hija Irene no estaba entonces en la ciudad). Pero pronto le llegaron invitaciones. La primera, el 26 de mayo, de París, a cargo de Léon Brillouin, seguida el 31 del mismo mes del ofrecimiento de una cátedra en Belgrado. Más atractiva fue la que recibió el 15 de junio de Cambridge, no de una cátedra sino de una *lecturership*, que finalmente aceptó. Sin embargo, no fue este su destino final aunque sí pasó allí, a orillas del Cam, donde brillaba la física en el Laboratorio Cavendish, varios años, sino Edimburgo, donde asumió a partir de octubre de 1936 la cátedra *Tait* de Filosofía Natural (el nombre aún utilizado en el Reino Unido para muchas cátedras de Física) que había dejado vacante por su temprana jubilación

Charles Galton Darwin. Allí permaneció diecisiete años, hasta su jubilación en 1953, momento en que regresó junto a su esposa, Hedi, a Alemania, instalándose en Pyrmont, a setenta kilómetros al sur de Hanover, un lugar tranquilo no lejos de Gotinga donde pasar sus últimos años. Antes Born había propuesto a Franck que se mudasen con ellos (James y Hertha) a los alrededores del lago de Constanza, una idea que Franck no aceptó prefiriendo continuar viviendo en Estados Unidos. La carta, plena de tristeza, melancolía y sentido práctico, que Franck escribió a Born sobre aquella propuesta es reveladora:

“Mi querido Born, tentador como parece el plan de instalarnos con vosotros dos [...] en el lago Constanza para los días que nos queden, no resultará para nosotros. En lo que se refiere a mí, un fuerte sentimiento de reserva debido a lo que sucedió en Alemania me hacer sentir incómodo. Aunque esto pueda no ser el factor decisivo, existe todo un conjunto de otros factores importantes: mis hijos y nietos que estarían tan lejos si yo regresara a Alemania que podría no volverlos a ver de nuevo; mi trabajo, por el que a pesar de mi estatus de emérito sigo siendo pagado año tras año (no podría vivir sólo con mi pensión... y puedes comprender que no me es posible prescindir de mucho debido a todas nuestras obligaciones). Por último, no tengo idea cuánto de vida en esta tierra me quedará y querría ser enterrado al lado de Ingrid en Chicago. He dejado a Hertha fuera de mi lista de razones hasta ahora pero, si todas esas razones no fueran suficientes, el hecho de que a Hertha todavía le quedan varios años de activa productividad ante ella es probablemente suficiente para que los planes que me presentas sean imposibles para nosotros. Acaso tú no puedas comprender esto completamente, pero mi matrimonio con Hertha ha devuelto un aire de realidad a mi vida. Sin embargo, solo vivimos juntos unos pocos meses al año, sencillamente porque no podría esperar en buena conciencia que Hertha quedase más o menos hambrienta después de mi muerte a cambio de un par de años de vivir juntos. Ella necesita conservar su cátedra y, lo que es más importante, tiene éxito en su trabajo, tanto que incluso si fuese posible financieramente (incluso contando con el dinero que vendrá de Alemania), sería simplemente vergonzoso apartarla de su vida. Por tanto creo que comprenderás por qué tu plan no es factible para nosotros. No lo rechazo a la ligera porque, nuestra vieja amistad aparte, ese acogedor rincón en el lago Constanza siempre me ha parecido un lugar ideal para envejecer. Hace pocas semanas recibí unas postales desde allí y pensé, con verdadera nostalgia, que el único lugar decente para estar nosotros estaba retratado en esas postales”.

Pero volvamos a James Franck en Johns Hopkins. Allí ni las condiciones ni el salario resultaron ser lo que Franck necesitaba, de manera que cuando en 1938 la Universidad de Chicago le ofreció integrarse en ella aceptó rápidamente. En 1941, Ingrid, la esposa de Franck, falleció y cinco años después, el 29 de junio de 1946, él y Hertha Sponer contrajeron matrimonio, aunque vivían la mayor parte del tiempo separados porque Franck continuó en Chicago mientras que Sponer

estaba instalada, desde febrero de 1936, en la Duke University (Durham, North Carolina), la primera mujer en la Facultad de Física de esta universidad, como catedrática (*full professor*).

Un detalle no irrelevante y desde luego significativo es la carta que Robert Millikan, uno de los físicos más importantes e influyentes de Estados Unidos (había obtenido el Premio Nobel de Física en 1923), escribió el 24 de junio de 1936 al presidente de la Duke University, William Preston Few, respondiendo una solicitud de consejo de éste con respecto a la integración de Sponer en la universidad:

“Querido Presidente Few:

A duras penas sé cómo contestar a su carta del 11 de junio, pero como me pide una manifestación confidencial, me agrada decir unas palabras acerca de cómo me comportaría yo si quisiese formar un departamento de Física lo más fuerte posible en Duke University.

Yo introduciría en el departamento un número de hombres jóvenes de la mayor habilidad que pudiese encontrar, y entonces les daría toda oportunidad posible para elevarse hacia posiciones de influencia dentro y eminencia fuera. En vista del hecho que al menos el 95 % de las mentes más capaces que están yendo en la actualidad a la física son hombres – de hecho, no recuerdo que figure ninguna mujer entre los varios cientos de *National Research Fellows* de física que han sido elegidos en los últimos diez años –, me parece que mis posibilidades de formar un departamento muy potente serían mayores si realizara mis elecciones entre los *National Research Fellows* más brillantes, u otros hombres jóvenes igualmente sobresalientes que por una razón u otra no hayan considerado acertado ser candidatos a *National Research fellowships* [becas]. En conjunto, las mujeres han realizado trabajos sobresalientes y se encuentran entre los principales científicos en el campo de la biología; y algo en el campo de la química, e incluso en la astronomía, pero en nuestro país no han surgido todavía mujeres físicas sobresalientes. En Europa, Fraülein Meitner de Berlín y Madame Curie de París se encuentran entre los principales físicos del mundo. Yo esperarí, por consiguiente, obtener más influencia, así como una mayor rentabilidad a mi inversión si al introducir sangre joven en el departamento de Física seleccionase uno o dos de los más brillantes hombres jóvenes, que si ocupase una de las vacantes con una mujer. Podría cambiar de opinión si conociese otras mujeres con los logros y que hayan alcanzado la eminencia de Fraülein Meitner. No conozco ninguna otra mujer viva que se le pueda comparar o que tenga la posibilidad de llegar a tales logros en el futuro.

Asimismo, en el funcionamiento interno de un departamento de Física de una gran universidad, yo esperarí que los más brillantes y capaces jóvenes hombres se viesen atraídos al departamento de graduados por el carácter de los *hombres* [Millikan empleaba aquí un subrayado doble] de la plantilla, más que por el carácter de las mujeres.

Estas consideraciones se refieren más al nivel de graduados que al de no graduados. En una institución coeducacional en la que existan muchas mujeres estudiantes es, indudablemente, deseable también tener, con fines pedagógicos, instructores que sean mujeres, pero sólo en casos muy excepcionales pensarí yo que el avance del trabajo graduado se verí promocionado de igual manera por una mujer que por un hombre”.

Afortunadamente, el presidente Few no siguió la recomendación de Millikan y Helga Sponer reanudó allí su carrera científica con gran éxito, consolidando su prestigio en el campo de la espectroscopía molecular, especialmente en moléculas poliatómicas. Se jubiló en 1965 siendo nombrada profesora emérita.

CHARLOTTE RIEFENSTAHL-HOUTERMANS

El siguiente caso que voy a mencionar, el de Charlotte Riefenstahl (1899-1993), no es el de una científica tan distinguida como Blau o Sponer, pero también merece ser recordada no solo por haber estudiado en la Universidad de Gotinga, sino por el conjunto de su biografía, en la que influyó poderosamente el hombre con quien se casó en agosto de 1930, Fritz Houtermans (1903-1966). También, como se verá, porque conoció a María Goeppert. Como ella misma reconoció en su autobiografía (reproducida en *Standing Together in Troubled Times*): “Mi vida fue todo menos ordinaria. Pasé por juicios y tribunales, golpes y desilusiones. Este ha sido un siglo terrible, con sangre y crueldad. Ahora, cuando todos estos acontecimientos yacen en el pasado lejano, y aparecen en mi mente como fragmentos de una película sin final, como recuerdos e instantáneas que ya no me hieren, he alcanzado la cumbre. Mirando hacia atrás, a mi pasado, a menudo pienso que nací bajo una estrella muy afortunada.” “Mi madre”, escribió también allí, “quería que fuera escritora, pero fue la física la que me capturó. La mayor parte de la gente no comprende esto, pero la física es como la filosofía. La física responde a todas estas cuestiones sobre lo que sucede alrededor nuestro. Se encuentra en un nivel más profundo que la filosofía. Si hoy tuviera que elegir de nuevo, todavía estudiarí física”.

Charlotte comenzó a estudiar en la Universidad de Gotinga en 1922, en un momento en que “la inflación estaba creciendo a un ritmo tal que al final el dinero había perdido su valor. El cuerpo estudiantil estaba amenazado con la inanición. Con una comida al día y prácticamente sin dinero todavía estudiábamos, nos ilusionaba la física, el amor y la vida en general, y asumíamos todas estas miserias más o menos como inevitables y nos arreglábamos para olvidarlas o superarlas”. De la universidad decía: “La Universidad de Gotinga era la mejor universidad de Alemania, tal vez de todo el mundo. Aprendí matemáticas de genios como Richard Courant y David Hilbert, y física y química-física de Max Born, Heinrich Hertz, James Franck, Hertha Sponer y Gustav Tammann”. Bajo la dirección de este último obtuvo [en el Instituto de Química-Física] su doctorado en 1927.” Y más adelante añadía:

“Yo era la única mujer en la clase, y era muy agradable. Estaba rodeada de un alegre grupo de jóvenes que eran entusiastas de la ciencia. Lo único malo era que no estudié todo lo que podría haber hecho porque estaba ocupada enseñando para ganar dinero. Llegué a conocer a todos ellos: Robert Oppenheimer, Fritz Houtermans, Walter Elsasser, Viki Weisskopf, Edward Condon, Thorfin Hogness, Patrick Blackett, Michael Polanyi, George Gamow, Robert Atkinson y Leo Szilard. Hoy estos nombres constituyen el *Who is Who* de la física teórica. Pero para mí sólo eran compañeros de clase, amigos y maestros – magnéticamente atractivos, obsesionados con sus ideas con cambiar el mundo – con los que salía e iba a conciertos”.

La lista es, ciertamente, impresionante. Con uno de los nombrados, con Fritz Houtermans se casó, divorció, volvió a casarse y a divorciarse.

Antes incluso de doctorarse, Charlotte decidió que quería dedicarse a la enseñanza y hacerlo en Estados Unidos. Escribió en este sentido al presidente del Vassar College, en Poughkeepsie (Nueva York) el 18 de marzo de 1924 ofreciéndose como “una estudiante del Instituto de Químico-Física de la Universidad de Göttingen que está trabajando para su doctorado”, que, decía, “esperaba terminar en unas pocas semanas”. Pronto recibió una respuesta positiva de *Vassar*, pero su supervisor, Tammann, no quería que se fuera y se negó a escribir una carta de recomendación en su favor. Afortunadamente, Franck y Born sí la apoyaron y aunque por entonces Riefenstahl no estaba muy animada a abandonar Göttingen por la relación que había iniciado con Houtermans, ambos decidieron que lo mejor era que ella pasase un año en América, hacia donde partió finalmente en el verano de 1927 ya con el título de doctor (defendió su tesis el 20 de julio; versaba sobre la recristalización en la plata y el oro y la variación de la resistencia eléctrica). En lugar de un curso permaneció allí dos años, regresando a Europa en 1929.

A comienzos de 1930, Riefenstahl y Houtemans recibieron una invitación de su amigo Georg Gamow – un físico famoso tanto por sus contribuciones como por su simpático carácter – para que asistieran a un congreso de Física que se iba a celebrar en Odesa. Como recordaría Charlotte las sesiones, que se celebraron en el Ayuntamiento de la ciudad, estaban presididas por un gran cartel en el que se leía, en varios idiomas: “¡Físicos del mundo, uníos! ¡En nombre de un futuro luminoso para toda la humanidad!”. Después del congreso, muy en el estilo propagandístico que entonces utilizaban las autoridades soviéticas cuando se trataba de visitantes extranjeros con algún grado de notoriedad, organizaron un tour en un crucero que llevó a los congresistas a varios lugares, comenzando por Yalta y finalizando, ya utilizando otro medio de transporte, en Moscú y Leningrado (hoy San Petersburgo). En aquella atmósfera Fritz propuso a Charlotte que se casasen. Esta aceptó inmediatamente, y el enlace se celebró en el primer puerto al que arribaron, Batumi, en Georgia, con los físicos Rudolf Peierls y Wolfgang Pauli actuando de testigos.

Instalados en Berlín, Charlotte trabajó primero en la editorial *Springer Verlag* y luego como ayudante en la Radium Corporation Ltd., mientras que Fritz combinó actividades de índole política (era comunista – pertenecía al partido comunista alemán desde la década de 1920 – y convenció a Charlotte para que se uniera al partido), con aplicar la experiencia que había conseguido con Franck en espectroscopía atómica para determinar la abundancia relativa de isótopos; fue, de hecho, el primero en medir la estructura hiperfina de isótopos separados artificialmente.

Con Houtermans, Charlotte vivió épocas convulsas. Fritz fue un físico brillante, pero al mismo tiempo muy comprometido políticamente, actividad que le acarreó serios problemas. Un buen resumen de esos problemas se encuentra en la carta que James Franck, instalado ya desde hacía algún tiempo en Chicago, envió al cónsul de Estados Unidos en Berlín en septiembre de 1940:

“Estimado señor,

El Dr. Fritz G. Houtermans, un discípulo mío y un científico que es muy conocido en todas partes gracias a sus muy valiosos artículos, solicita un visado de inmigración a los Estados Unidos. Tengo entendido que su solicitud está apoyada por declaraciones juradas pero no obstante un grupo de nosotros, interesados en la personalidad del Dr. Houtermans al igual que en su gran habilidad como físico, queríamos apoyarlo con fuerza ante usted.

El Dr. Houtermans fue uno de mis mejores estudiantes en Göttingen; llegó a ser después ayudante en el Physikalische Institut der Technischen Hochschule de Berlín y *Privdozent*. En 1933 se trasladó a Inglaterra [acompañado por Charlotte y el hijo que ya tenían] donde consiguió un buen puesto en la industria, pero inclinado más a la investigación científica aceptó [en 1934] un puesto en el Instituto Físico Técnico de Kharkov, en la URSS, donde vivió, junto a su esposa [que trabajó como traductora] y dos hijos [el segundo nació en Rusia], hasta que todos los extranjeros fueron despedidos por un decreto el Gobierno soviético. Mientras estaba abandonando el país fue arrestado [el 1 de diciembre de 1937] sin ningún cargo contra él y pasó dos años y medio en prisión antes de ser enviado a Alemania [fue durante la breve alianza germano soviética cuando le entregaron a la Gestapo, pero después de prestar a esta algunos servicios fue liberado].

En relación a esto pienso que es adecuado mencionar que Houtermans era un hombre muy joven que deseaba reformar el mundo y participó de ideas comunistas; pero cualesquiera que fuesen sus tendencias, los años que pasó en Rusia, incluyendo los que estuvo bajo las más terribles circunstancias en manos de la Policía Secreta Soviética, barrieron toda su simpatía por el comunismo si es que no la había perdido ya al madurar. Es mi profunda opinión que sería un leal y devoto ciudadano en este país. Si usted fuese capaz de conceder un visado al Dr. Houtermans, admitiría un científico valioso que estaría agradecido de vivir aquí

y que podría reparar su deuda con Estados Unidos mediante trabajos científicos o industriales de alto estándar.

La Sra. Houtermans, que también es amiga nuestra desde el tiempo en que estudió en Göttingen y que ha trabajado el último año como ayudante de investigación en Física en Vassar College, está obviamente muy ansiosa por reunirse con su marido y padre de sus hijos. La madre del Dr. Houtermans también es científica y enseña en este país [en una escuela privada de Massachusetts].

Estoy convencido de que al tomar su decisión también tendrá usted en cuenta el lado humano del caso del Dr. Houtermans. Nosotros, sus amigos y colegas, haremos todo lo que sea posible por ayudar al Dr. Houtermans después de que llegue aquí”.

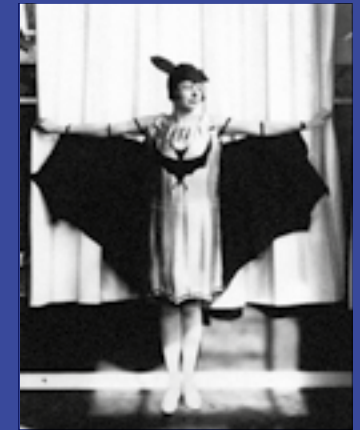
La carta muestra la bonhomía de Franck, pero no parece que apreciara correctamente el complejo carácter de Houtermans, como revela lo que realmente sucedió.

Con grandes dificultades, Charlotte consiguió abandonar la Unión Soviética con sus dos hijos en diciembre de 1937. Llegó a Copenhague donde recibió la ayuda de Niels Bohr. Pero no permaneció allí mucho tiempo: el 24 de enero de 1938 partió para Inglaterra, pero allí su situación llegó a ser dramática (Robert Oppenheimer, al que había conocido en Göttingen, le envió en marzo un cheque de 500 dólares). Finalmente consiguió emigrar a Estados Unidos, llegando a Nueva York el 6 de abril de 1939, donde la recibió la madre de Houtermans, que enseñaba latín, francés y alemán en la elegante Foxhollow School. Afortunadamente sus amigos de *Vassar* la auxiliaron: consiguieron para ella una pequeña beca por un año. Y cuando aquella beca terminó, la contrataron en el Wellesley College. Allí estuvo hasta 1942, pero entonces le ofrecieron un puesto en Radcliffe College, una institución para mujeres de Cambridge donde enseñó la primavera de 1945 (el curso 1943-1944 sustituyó a un profesor de Harvard que estaba de sabático, y en 1944-1945 compatibilizó sus clases en Radcliffe con un trabajo de investigación en el laboratorio de la compañía Polaroid). En su vida de trotamundos académica, Charlotte fue contratada el curso 1945-1946 por otra escuela de mujeres, Wells College, situada en Aurora (Cayuga County, Nueva York). Pero tampoco allí estuvo mucho tiempo.

Mientras tanto, Houtermans tras ser liberado por los rusos estuvo, como apunté, durante algún tiempo en una cárcel de la Gestapo, aunque pronto fue liberado. Su ascendencia judía era muy pequeña: un cuarto por parte de madre. Y permaneció en Alemania al no concedérsele el visado para emigrar a Estados Unidos. Entre 1942 y 1943 publicó tres artículos – el más importante sobre la reacción fotonuclear en el berilio –, todos en colaboración con Ilse Bartz, una ingeniera química de la que Houtermans se enamoró, decidiendo casarse con ella (tuvieron tres hijos). Necesitaba, obviamente, divorciarse de Charlotte, lo que hizo sin informarla (en Alemania existía una ley que permitía hacer esto –divorcio *in absentia*



María Goeppert en sus años de Göttingen



Max Born aparece al fondo en esta imagen familiar. María, en el lado izquierdo de la fotografía



Víctor F. Weisskopf, María Goeppert y Max Born, en Göttingen

– para quien hubiera estado separado de su marido o esposa durante cinco años, sin necesidad del consentimiento de la otra parte). “Decir que esto arruinó mi vida – escribió Charlotte en sus recuerdos – es decir nada. Mi amor, mis planes para el futuro, mis sueños, mis años de luchas para que Fritz fuese liberado, mi desesperación y esperanza, todo quedó destruido en un pestañeo.”

Como decía, Charlotte Riefenstahl-Houtermans no estuvo mucho tiempo en Wells College. Y en este punto intervino María Goeppert Mayer, quien por entonces llevaba ya años instalada en Estados Unidos. Ambas, María y Charlotte, se conocían de los tiempos de Gotinga. En palabras de Riefenstahl-Houtermans: “Conocí a María Goeppert en 1924 en Gotinga. Ella era siete años menor que yo y se acababa de matricular en la Universidad de Gotinga para estudiar matemáticas. Había pocas chicas en las ciencias exactas, de manera que estábamos destinadas a encontrarnos. Uno de los examinadores de la defensa de su tesis fue James Franck, que también estuvo en el comité de mi tesis”. Y después de ofrecer algunos datos de la carrera de Goeppert Mayer en Estados Unidos – datos que detallaré en otro capítulo – explicaba que “en 1941, María consiguió por fin su primer puesto profesional pagado, uno a tiempo parcial para enseñar en otro centro para mujeres, el Sarah Lawrence College de Bronxville, Nueva York, a 15 millas de Manhattan. Hasta el final de la guerra enseñó, aunque no de forma continua, allí [...]. En 1945, ofrecieron a Joe Mayer [su marido] un puesto en la Universidad de Chicago, creo que fue en el Departamento de Química”. Y en este punto Charlotte añadía que el 15 de agosto de 1945 María Goeppert Mayer había escrito a la Sra. Constance Warren, presidenta del Sarah Lawrence College la siguiente carta:

“Mi marido ha aceptado una cátedra en la Universidad de Chicago y espera comenzar allí el 1 de febrero [...].

En resumen, querría dejar el *College* después del primer semestre. Sin embargo, si no se puede encontrar un físico adecuado para que tome mi puesto yo estaría dispuesta a permanecer ahí hasta el final del año.

Me parece desaconsejable que el *College* busque un ‘sustituto’ solo para un semestre [...]. Deseo que se pueda encontrar un sucesor permanente satisfactorio para mi puesto.

Puede ser más fácil ahora, al comienzo del año, encontrar un físico. En ese caso yo estaría dispuesta a dimitir inmediatamente. En vista de las noticias de hoy [acababa de finalizar la Segunda Guerra Mundial], no debería ser demasiado difícil para el *College* obtener los servicios de un físico competente. ¿Puedo hacer unas pocas sugerencias de nombres que se me ocurren?

En primer lugar está la Sra. Charlotte Houtermans [...].

Siento mucho tener que marcharme, pero no tengo otra elección.”

La esposa (María) siguiendo, le conviniera o no, al marido. Pero lo que nos interesa ahora es que María recomendó a Charlotte. Y el presidente de Sarah

Lawrence College, Harold Taylor, que acababa de sustituir a Constance Warren, la llamó enseguida para una entrevista. “Quedó impresionado – recordó Charlotte – por mis credenciales en física, mi experiencia en la Unión Soviética y, en general, por mi sofisticación”. Taylor le ofreció inmediatamente un puesto, que aceptó una vez arreglada su situación anterior en el Wells College. Comenzó a enseñar en Bronxville en el verano de 1946 y permaneció allí 22 años, hasta su jubilación. Y aún retirada todavía continuó enseñando en el Manhattanville College de Purchase, NY hasta 1975. Siempre en *colleges* para mujeres. “Fui y todavía soy – manifestó también en sus memorias – una gran creyente en escuelas solo para mujeres porque ayudan a las chicas a desarrollar completamente su intelecto sin presiones sociales”.

Su contribución a la física fue, por consiguiente, no a través de la investigación, como sucedió en los casos de Blau, Sponer y Goeppert Mayer, sino enseñando la ciencia que con tan buenos maestros había aprendido. En su crédito también hay que añadir que tradujo del alemán al inglés un libro importante para la “nueva física”, el que había publicado en 1943 Gregor Wentzel, *Einführung in die Quantentheorie der Wellenfelder* (*Quantum Theory of Fields*), que apareció en 1949 (incluyendo un apéndice preparado por J. M. Jauch).

Y terminaré este apartado con unos apuntes concernientes al desarrollo de la vida personal de Charlotte y su relación con Fritz Houtermans.

En 1951, Charlotte viajó a Europa para visitar a su madre y hermana. Fritz le escribió que deseaba verla, de regreso de una conferencia en Copenhague. Y se vieron, después de 14 años de separación. Fritz, que en 1945 había conseguido un puesto en Gotinga y en 1952 una cátedra en la Universidad de Berna, le contó las dificultades que tenía en su matrimonio con Ilse y que seguía atraído por Charlotte. Aquel fue el primer paso para que, una vez que él obtuvo su segundo divorcio, Fritz y Charlotte se volvieran a casar en Berna en agosto de 1953. Pero esa “segunda vida” solo duró seis meses: en 1954 volvieron a separarse. “En 1960 – concluía Charlotte en sus memorias – mi correspondencia con Fisl [Fritz], que ya estaba limitada a asuntos prácticos, terminó [...]. La costumbre que Fisl tenía durante la última década de beber mucho, de fumar un cigarrillo tras otro, acabó finalmente con él. Se deprimió, ya nunca fue capaz de trabajar con el entusiasmo típico de los primeros ocho años de su vida en Berna. En 1965, le diagnosticaron cáncer de pulmón”. Falleció de un ataque al corazón en marzo de 1966.

EMMY NOETHER

Emmy Noether (1882-1935) fue una matemática sobresaliente, disciplina en la que brilló comparativamente mucho más que en Blau o Sponer en la física. Y también ligada a la Universidad de Gotinga. Se le puede considerar “sucesora” de otras matemáticas ilustres anteriores a ella, como Sophie Germain (1776-1831) o Sofia Kovalevskaya (1850-1891).

Después de asistir durante ocho años al Städtischen Höheren Töchter Schule (Escuela Municipal de Educación Superior para Hijas) de Erlangen, donde su padre, Max, era un distinguido catedrático de Matemáticas de la Universidad, Emmy pasó con excelentes calificaciones los exámenes del Estado de Baviera para maestros de inglés y francés. Con ello estaba calificada para enseñar idiomas extranjeros en cualquier institución educativa femenina. Pero esto no le bastaba; quería estudiar en la universidad. Tal vez por sus relaciones familiares, pudo lograrlo en una universidad (Erlangen) cuyo Senado había declarado en 1898 que la admisión de mujeres estudiantes “destrozaría todo orden académico”. De hecho, de entrada, Noether únicamente obtuvo permiso para asistir a las clases, no siéndole posible examinarse; esto solamente pudo realizarlo a partir de 1903, cuando la universidad cambió sus estatutos (de los 985 compañeros de Emmy en el semestre de invierno de 1900, únicamente uno era mujer). El 13 de diciembre de 1907 obtuvo el grado de doctor con una tesis titulada *Über die Bildung des Formensystems der ternären biquadratischen Form* (Sobre sistemas completos de invariantes para formas ternarias bicuadráticas) por la que recibió la calificación de *summa cum laude*; su mentor fue otro notable matemático, Paul Gordan.

Durante los años siguientes trabajó en el Instituto Matemático de Erlangen sin recibir ningún salario; ayudaba a su padre, ya mayor, y desarrollaba sus propios proyectos, especialmente en el campo de la teoría de los invariantes algebraicos. En 1916 se trasladó a Göttingen. Dejemos en este punto que sea Hermann Weyl, en el obituario (1935) que dedicó a Emmy, quien continúe el relato:

“Durante la guerra, en 1916, Emmy llegó a Göttingen; fue debido a la influencia directa de Hilbert y Klein que permaneció allí. Entonces, Hilbert tenía la cabeza puesta en la teoría general de la relatividad, y para Klein, también la teoría de la relatividad y su relación con sus viejas ideas del programa de Erlangen suscitó la última llamarada de sus intereses y producción matemática [...]. Tanto para Hilbert como para Klein, la presencia de Emmy era bienvenida ya que fue capaz de ayudarles con sus conocimientos teóricos de los invariantes. Para ambos, ella dio formulación genuina y universal de los aspectos más significativos de la teoría de la relatividad general: primero, la reducción del problema de los invariantes diferenciales a uno puramente algebraico, utilizando ‘coordenadas normales’; segundo, las identidades entre los lados de la izquierda de las ecuaciones de Euler de un problema de variaciones, que tiene lugar cuando la integral (múltiple) es invariante con respecto a un grupo de transformaciones que involucran funciones arbitrarias (identidades que contienen el teorema de conservación de la energía y el momento, en el caso de invariancia con respecto a transformaciones arbitrarias de las cuatro coordenadas del mundo)”.

Como señalé, Klein consideraba que lo que en realidad Einstein había hecho había sido aplicar la filosofía de su programa de Erlangen: si el núcleo central de la relatividad especial se podía interpretar como “el estudio de los invariantes bajo

las transformaciones de Lorentz”, la relatividad general no era “sino el estudio de los invariantes bajo transformaciones de coordenadas arbitrarias”. Con el estímulo de Hilbert y Klein, Noether abandonó durante un tiempo sus investigaciones sobre invariantes algebraicos, dedicándose a estudiar las relaciones en principios variacionales entre simetrías (o invariancias) y leyes de conservación, con el propósito último de elucidar el papel de las “identidades de Bianchi” en las ecuaciones del campo de la teoría de la relatividad general. En 1918 resolvió el problema, publicando un artículo (“Invariante Variationsprobleme”; “Problemas variacionales invariantes”) que contiene los que se denominan “teoremas de Noether”, unos instrumentos matemáticos esplendorosos no sólo, ni siquiera principalmente, para la relatividad general sino para el conjunto de la física teórica. Einstein recibió con entusiasmo estos trabajos de Noether; en este sentido, escribía a Hilbert el 24 de mayo de 1918: “Ayer recibí un artículo muy interesante de la Srta. Noether sobre la generación de invariantes. Me impresiona que estas cosas puedan ser tratadas desde un punto de vista tan general”. Y añadía: “No habría hecho daño a la vieja guardia de Göttingen que se hubiese enviado a la Srta. Noether para que les diese clase”. Unos meses más tarde, el 27 de diciembre, tras recibir el segundo de los artículos de Noether, repetía su admiración por ella – que como mujer era rechazada por los claustros universitarios – en una carta a Felix Klein: “Lo que me incita a escribirle hoy es un asunto diferente. Al recibir el nuevo artículo de la Srta. Noether, de nuevo he sentido la gran injusticia que es el que le sea negada la *venia legendi*. Yo apoyaría con fuerza el tomar medidas de presión en el Ministerio”.

Recurriendo de nuevo al obituario de Weyl:

“Durante la guerra, Hilbert intentó impulsar la Habilitación de Emmy Noether en la Facultad de Filosofía de Göttingen. Fracasó debido a la resistencia de los filólogos e historiadores. Es una anécdota muy conocida que Hilbert apoyó su solicitud declarando en una reunión de la Facultad: ‘No veo que el sexo de un candidato sea un argumento en contra de su admisión como *Privatdozent*. Después de todo, somos una universidad y no un establecimiento de baños’. [Según la *Privatdozentenverordnung* de 1908, sólo podía ser concedida a candidatos masculinos (una protesta posterior ante el Ministerio de Cultura fue rechazada)]. No obstante, [Noether] fue capaz de dar clases en Göttingen, que eran anunciadas bajo el nombre de Hilbert. Pero en 1919, después del final de la Guerra y la proclamación de la República Alemana, las condiciones cambiaron y su Habilitación fue posible. En 1922 siguió su nombramiento como un ‘*nicht-beamteter ausserordentlicher professor*’; esto era un mero título sin obligaciones ni salario asociados. Sin embargo, se le adjudicó un *Lehrauftrag* para álgebra, que llevaba una modesta remuneración”.

En esa situación permaneció hasta 1933. No obstante, simultáneamente su carrera como matemática creativa progresaba. He aquí cómo vio Weyl aquella intrínsecamente antagónica situación:

“Cuando, en 1930, obtuve un puesto permanente en Göttingen, con el mayor interés intenté del ministerio conseguir para Emmy un puesto mejor, ya que me avergonzaba ocupar una posición por encima de ella, sabiendo como sabía que como matemática era superior a mí en muchos aspectos. No tuve éxito, ni tampoco logré nada en un intento de que fuese nombrada miembro de la Göttinger Gesellschaft der Wissenschaften (Academia de Ciencias de Göttingen). Tradición, prejuicio, consideraciones externas, pesaron en contra de sus méritos y grandeza científica, que por entonces nadie negaba. Durante mis años en Göttingen, 1930-1933, ella fue sin duda el centro de actividad matemática más fuerte, considerando tanto la fertilidad de su programa de investigación científica como su influencia sobre un amplio círculo de discípulos”.

Con la llegada al poder de los nazis en enero de 1933 la situación se hizo aún peor para Emmy, que a su condición de mujer añadía la de judía. En abril, se le retiró tanto *venia legendi* como *Lehrauftrag* (salario incluido, naturalmente). En julio, dos *colleges* para mujeres, Bryn Mawr, en Pennsylvania, Estados Unidos, y Somerville, en Oxford, se interesaban por conseguir sus servicios. Finalmente, con la ayuda financiera de la Rockefeller Foundation, aceptó un puesto de un año académico de duración en Bryn Mawr College. En octubre embarcaba hacia el Nuevo Mundo.

No tuvo suerte, sin embargo, en esta nueva fase de su vida. Académicamente las cosas le fueron bien: a partir de febrero de 1934 comenzó a dar clases semanales en Princeton, no lejos de Bryn Mawr, en donde por otra parte se le renovó por un año más su contrato. Pero el 14 de abril de 1935, Emmy Noether falleció en el Bryn Mawr Hospital como consecuencia de una operación, en principio no demasiado seria.

María Goeppert, alumna de la Universidad de Göttingen y discípula de Born

Superado el *Abitur*, cuando llegó el momento de pensar en cursar una carrera universitaria, María Goeppert escogió las matemáticas, ciencia para la que estaba bien dotada; tal vez también influyera el que Hilbert fuese vecino y amigo de su familia, pero parece que le influyó más aún enterarse que en las escuelas e institutos había escasez de profesoras de matemáticas (consecuencia de esta escasez fue que aumentó significativamente el número de mujeres que estudiaron matemáticas en la universidad).

María Goeppert fue admitida en la Universidad de Göttingen en la primavera de 1924 y, salvo un semestre que pasó en Inglaterra, cursó allí todos sus estudios universitarios. Primero se dirigió a las matemáticas, pero un día de 1927 Max Born, que formaba parte del círculo de amistades de la familia Goeppert, la invitó a que asistiera a los seminarios de física que dirigía. De hecho, pocos años antes, estando todavía en la Frauenstudium, María ya había tenido algún contacto con la nueva física atómica. Este contacto le llegó a través de Hilbert que la invitó a



María en sus años de estudiante en Göttingen

Joseph Mayer con María y la madre de esta en el coche que el científico había comprado al poco tiempo de llegar a Göttingen



Joseph y María ya casados

María Goeppert fue admitida en la Universidad de Göttinga en la primavera de 1924 y, salvo un semestre que pasó en Inglaterra, cursó allí todos sus estudios universitarios. Primero se dirigió a las matemáticas, pero un día de 1927 Max Born, que formaba parte del círculo de amistades de la familia Goeppert, la invitó a que asistiera a los seminarios de física que dirigía.

asistir a una serie de conferencias semipopulares que ofreció sobre el tema. A María le gustó, pero su interés por la física permaneció dormido por entonces. Pero cuando Born la invitó, el viejo interés despertó, favorecido por formar parte de un animado grupo de entre veinte y treinta inteligentes compañeros. Aquel mismo año de 1927, el 9 de febrero, su padre falleció y ello acrecentó la estrecha relación que mantuvo toda su vida con Born, quien también dirigió su tesis doctoral. Con Born, y en el ambiente de Göttinga, María Goeppert adquirió una espléndida formación en mecánica cuántica, en su dimensión matemática pero también, gracias a la influencia de Franck, en otra más intuitiva y experimental. En Estados Unidos este conocimiento superior de la mecánica cuántica le sería de mucha utilidad pues allí esta teoría fue introduciéndose en algunas universidades con lentitud.

En sus memorias, Born recordó a María de la siguiente forma:

“Entre los estudiantes alemanes destacaba María Goeppert, la hija del catedrático de pediatría en la Universidad de Göttinga que a menudo había atendido a nuestros hijos. María era una adorable y vital jovencita, y cuando apareció en mi clase me quedé algo sorprendido. Pasó por todos mis cursos con gran aprovechamiento y dedicación, y sin embargo al mismo tiempo continuaba siendo una alegre e ingeniosa miembro de la sociedad de Göttinga, aficionada a las fiestas, a reír, bailar y bromear. Nos hicimos grandes amigos. Después de que obtuviese el título de doctor con una muy buena tesis sobre un problema de mecánica cuántica, se casó con un joven americano, Joe Mayer, que trabajaba conmigo en problemas de la teoría de cristales.”

Debido a la personalidad que retrataba Born, María atraía a algunos de los jóvenes físicos que entonces estudiaban o investigaban en Göttinga. Uno de ellos fue Victor Weisskopf, como reconoció en sus memorias:

“Me sentí atraído por María Göpper, a la que sus amigos llamaban ‘Misi’. Era la hija de un bien conocido catedrático de pediatría y su familia pertenecía a la ‘buena sociedad’ de Göttinga. También estudiaba física teórica y su tesis estaba relacionada con la mía. Durante algún tiempo nos gustábamos mucho. Entonces un joven estudiante americano llegó a la universidad. Nos impresionó cuando

fue a un vendedor de coches, puso delante de él una pequeña pila de dinero y salió conduciendo un coche nuevo. En aquel tiempo la idea de que un estudiante fuese propietario de un coche era absurda. No creo que fuese solo el coche, pero pronto la hermosa Misi estaba saliendo con el americano, Joe Mayer, con quien se casó más tarde”.

Otro de los muchos jóvenes físicos que estaban entonces en Göttinga, y que dejaron huella en la ciencia, era Walter Elsasser, que también se refirió a María en sus recuerdos: “Cuando estaba terminando mi tesis, Born [su director de tesis] adquirió otro estudiante de investigación. María Mayer, con la que entonces tuve poco contacto [...]. Parecía ser la mujer mejor vestida en la calles de Göttinga. Sospecho que no estaba sometida a las severas restricciones económicas con que teníamos que vernos los otros jóvenes. Pero esto no le impidió progresar en la física teórica y desarrollar un alto grado de conocimientos en cálculos que debieron haber sido muy útiles para Max Born”.

María Goeppert finalizó su doctorado en febrero de 1930. Lo hizo poco después de contraer matrimonio – el 19 de enero – con un físico estadounidense, Joseph Mayer, que, como se verá en la sección siguiente, estaba pasando un año en Göttinga.

Aunque por entonces tenía ya resueltos muchos de los problemas de los que se ocupaba en la tesis (planteados por Born), no le resultó fácil organizar sus contenidos, entre otros motivos por la alteración que significó su relación con Mayer. En su biografía de María, Joan Dash incluyó una circunstancia que la ayudó a completar la tesis:

“Un día María y Joe [Mayer] fueron en el pequeño Opel de Joe a Leiden para visitar al teórico [Paul] Ehrenfest [sucesor de H. A. Lorentz cuando éste se jubiló voluntariamente de su cátedra], que pasaba mucho tiempo en Göttinga y que era uno de sus más dotados maestros, tan dotado que en cierta ocasión James Franck señaló: ‘Me daba miedo preguntarle algo, porque si lo hacía empleaba un tiempo terrible. No me dejaba escapar de sus mandíbulas, debo decir, hasta que yo comprendía realmente lo que le había preguntado y en todos sus detalles. A veces yo no quería comprender cada detalle’. Una vez que llegaron a la casa de Ehrenfest [...] éste quiso saber cómo escribiría María su tesis. María le explicó sus ideas, Ehrenfest la escuchó y entonces le dijo que no había más tiempo que perder, que tenía que subir inmediatamente y que no bajase hasta que toda la tesis estuviese escrita aproximadamente. Entonces la condujo a su propio estudio, cerró con llave y la dejó allí; tres horas después María había completado un esbozo que satisfizo a Ehrenfest”.

La tesis de María Goeppert – que juzgaron Born, Franck y Adolf Windaus (Premio Nobel de Química en 1928) – consistió en un estudio teórico de procesos con dos fotones (la probabilidad de que se emitieran dos fotones en una única transición atómica). En un obituario que le dedicó Eugene Wigner, que como veremos recibió la mitad del Premio Nobel de Física el mismo año que lo obtuvieron

(un cuarto cada uno) María y Hans Jensen, explicaba que se trataba de “una obra maestra de claridad y concreción”. En la época en que realizó este trabajo las posibilidades de someter sus predicciones teóricas a comprobación experimental eran remotas, fue bastante años después cuando los fenómenos de dobles fotones adquirieron importancia experimental tanto en física nuclear como en astrofísica, más aún con el desarrollo de los láseres y la óptica no lineal.

Un avance de su tesis constituyó su primera publicación: “Über die Wahrscheinlichkeit des Zusammenwirkens zweier Lichtquanten in einem Elementarakt”; apareció en el volumen 17 (1929) de la revista *Naturwissenschaften*. En 1931 publicó otros dos artículos producto de sus años en Göttingen, uno en solitario (“Über Elementarakte mit zwei Quantensprungen”, *Annalen der Physik*), y otro con Max Born, un extenso capítulo de 171 páginas (“Dynamische Gittertheorie der Kristalle”; “Teoría dinámica de red de cristales”), que apareció en el volumen 24 del *Handbuch der Physik*. Pudo completar este extenso trabajo porque pasó los veranos de 1931, 1932 y 1933 en Göttingen, viendo a su madre y aprovechando para continuar colaborando con Born. En 1935 publicó otro artículo, sobre la doble desintegración beta, relacionado con su tesis, esta vez ya en inglés y en la revista estadounidense de física (y pronto del mundo) más importante, *Physical Review* (vol. 48): “Double beta-disintegration”.

Joseph Mayer

Joseph Edward Mayer (1904-1983) era un neoyorquino que en 1921 entró en el California Institute of Technology (también conocido como Caltech) para estudiar química en la época en que enseñaban allí científicos tan notables como Richard Tolman y el químico-físico Arthur Amos Noyes, y comenzaba su carrera Linus Pauling. Una vez que obtuvo en Caltech su B.S. en 1924, Mayer se trasladó con una beca a otro distinguido centro de enseñanza californiano, la Universidad de California en Berkeley para formarse bajo la dirección del gran químico-físico Gilbert Newton Lewis. “Pronto [Lewis] se convirtió y permanece siendo hasta hoy día una de mis grandes ídolos”, manifestó Mayer en un escrito autobiográfico. Bajo la dirección de Lewis completó su tesis doctoral, *The Disproof of the Radiation Theory of Unimolecular Reactions*. “No recuerdo exactamente – señaló en el escrito que acabo de mencionar – cuándo comencé a trabajar en lo que en lo que se convirtió en mi disertación. Se trataba de un truco experimental bastante difícil y, de hecho, creo que si lo hubiese comenzado después de comprender realmente la mecánica cuántica, no habría considerado que fuese digno de llevarse a cabo”.

Mientras permaneció en Berkeley, Mayer publicó cuatro artículos con Lewis (“Thermodynamics based on the laws of statistics”, parte I y parte II, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 14, 1928; “The quantum laws and the uncertainty principle of Heisenberg”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 15, 1929; “The thermodynamics of gases which show degeneracy”, *Proceedings of*

Joseph Edward Mayer (1904-1983) era un neoyorquino que en 1921 entró en el California Institute of Technology para estudiar química en la época en que enseñaban allí científicos tan notables como Richard Tolman y el químico-físico Arthur Amos Noyes, y comenzaba su carrera Linus Pauling. En el otoño de 1929 se trasladó a Göttingen con una beca del Consejo Nacional de Investigación, dotada económicamente por la Fundación Rockefeller, para trabajar con James Franck, que había estado anteriormente en Berkeley, aunque también colaboró con Max Born.

the National Academy of Sciences 15, 1929; y “The thermodynamics of gases which show degeneracy”, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 15, 1929).

En el otoño de 1929 se trasladó a Göttingen con una beca del Consejo Nacional de Investigación, dotada económicamente por la Fundación Rockefeller, para trabajar con James Franck, que había estado anteriormente en Berkeley, aunque también colaboró con Max Born, con quien publicó un artículo (“Zur gittertheorie der ionenkristalle”, *Zeitschrift für Physik* 75, 1932), el primero de una serie de artículos sobre la termodinámica de los cristales iónicos, tema en el que continuaría investigando durante los siguientes quince años. Un compañero suyo en Berkeley, que había estado en Göttingen, le recomendó que en lugar de alojarse en una pensión en Göttingen, como hacía la mayor parte de los estudiantes americanos, era mucho mejor poder conseguir una habitación en alguna casa particular. Y mencionó que tal vez podría obtenerla en la casa de la familia Goeppert, que, pensaba, seguramente estaría abierta a esta posibilidad después del fallecimiento del profesor Goeppert. Efectivamente, el año anterior la señora Goeppert ya había alquilado una habitación a un físico-químico estadounidense que alcanzó fama (obtuvo el Premio Nobel de Química en 1966 “por ampliar el conocimiento de los enlaces químicos y la estructura electrónica de las moléculas mediante el método orbital”): Robert Mulliken.

Antes de proceder con Joseph Mayer es interesante mencionar lo que Mulliken recogió en su autobiografía sobre su estancia en el verano de 1927 en la casa de la familia Goeppert:

“Mientras estuve en Göttingen aquel verano viví en la casa de Frau Goeppert, viuda de un muy conocido pediatra. Tenía una hija, María, que estudiaba entonces en la universidad. Un día María me preguntó si me gustaría ir con ella a un evento social en la universidad. Acaso groseramente, decliné la invitación [...].

María fue una brillante científica en física y química. Por su trabajo explicando la estructura interna de los núcleos compartió con J. Y. Jensen de Heidelberg el Premio Nobel de Física en 1963 [...] A veces pienso lo que habríamos podido haber hecho si me hubiese casado con ella. Sus conocimientos de matemáticas y mecánica cuántica eran muy superiores a los míos y nos podría haber ido bien juntos. Los científicos a menudo se casan con científicos, y esto puede hacer que sean más eficaces en sus trabajos”.

Y un poco más adelante, añadía a su visión práctica (¿interesada?) de la vida el siguiente comentario: “Mi propia sensación es que es que para un hombre científico es mejor casarse con quien no sea científica porque ella le ayudará a darle perspectivas e intereses más amplios”.

Ya en Gotinga, cuando Joseph Mayer llamó a la puerta de la casa de los Goeppert, la criada abrió la puerta pero le dijo que la señora estaba enferma y no podía ver a nadie, pero que preguntaría a su hija si podía atenderlo. Y, en palabras de Mayer:

“La hija vino, sonrió compresiva ante mi pobre alemán, y entonces respondió en un bello inglés de Cambridge, que su madre estaba enferma, pero que era solo un resfriado aunque no quería ver a nadie, y que volviera en un día o dos, lo que hice [...]. Quedé muy impresionado con la hija y en particular con su perfecto inglés, que más tarde supe había aprendido durante un semestre en Cambridge, en el laboratorio de Rutherford, con una beca alemana. Se había alojado en el Girton College, que era entonces el único *college* para mujeres en Cambridge. Yo me sentía relativamente rico y compré un Opel [...], un coche maravilloso [...]. Creo que la existencia del Opel cambió mi vida futura. Era una máquina bella y yo era el único de los jóvenes estudiantes de la facultad que tenía un automóvil. María era la *belle* de Gotinga, como descubrí pronto. Ella y las dos hijas del *Herr Professor* Landau [matemático], junto a Titi Stein, parecían componer el único contingente femenino aceptable en toda reunión de estudiantes”.

Y continuaba con comentarios del estilo, hasta que añadía: “En Gotinga me encontré con varias cartas de la Universidad Johns Hopkins ofreciéndome un puesto de asociado [...]. Respondí afirmativamente y me sentí muy feliz de tener asegurado un empleo cuando regresase a Estados Unidos. Entre tanto estaba cada vez más interesado en intentar inducir a María a que me acompañase en mi regreso a Estados Unidos como mi esposa. Esto no era completamente trivial; la cuota de inmigración para alemanes estaba completa con varios años de adelanto. Sin embargo, descubrí en el consulado que mi esposa podría obtener una visa especial. Esto funcionó. Recuerdo que la tía favorita de María, que no era mucho mayor que ella, la esposa del hermano más joven de su padre, le dijo: ‘Eres afortunada en poder ir a América. Mis hijos se irán el año que viene’.

Y así el destino de María, ya Goeppert Mayer, se encaminó hacia América.



Despedida de Franck de Berlín. De izquierda a derecha: sentados, Hertha Sponer, Albert Einstein, Ingrid Franck, James Franck, Lise Meitner, Fritz Haber y Otto Hahn; de pie, Walter Grotian, Wilhelm Westphal, Otto von Baeyer, Peter Pringsheim y Gustav Hertz

Otto Hahn y Lise Meitner



Participantes en el Congreso sobre Radiactividad (Münster, Westfalia, 1932). De pie, desde la izquierda: Von Hevesy, Señora Geiger, Lise Meitner, Otto Hahn; sentados: James Chadwick, Hans Geiger, Ernest Rutherford, Stefan Meyer y Prizibram



Reunión en el Instituto de N. Bohr (Copenhague, 1934). Primera fila (izda. a derecha.): W. Pauli, P. Jordan, W. Heisenberg, M. Born, L. Meitner, O. Stern, J. Franck. Segunda fila: M. Oliphant, M. Saha, C.F. von Weizsäcker, F. Hund, F. Reiche, H.D. Jensen, F. London, O. Frisch. Quinta fila: E. Teller y V. Weisskopf

Estados Unidos

Cuando María Goeppert Mayer abandonó Europa en marzo de 1930 a bordo del transatlántico *SS Europa*, en compañía de su esposo y de Kate Mayer, hermana de este a quien había estado visitándole, no podía ignorar que se iba a enfrentar a un mundo muy diferente del en numerosos aspectos bastante cerrado y desde luego elitista, aunque lo fuese en “lo intelectual”, que predominaba en Gotinga. Eso sí, María no fue un ejemplo de “emigrante temprana”; puesto que cuando abandonó Alemania en 1930 Hitler no había alcanzado todavía el poder, no era ni siquiera imaginable la terrible guerra que asolaría una parte importante del mundo y, además, su ascendencia judía era pequeña (una abuela y bisabuela), un obstáculo, en cualquier caso, que como hemos visto en los ejemplos, de Born o Franck, no era insalvable para desarrollar una carrera académica. Pero sin duda sabría que como mujer le sería muy difícil, si no imposible, poder alcanzar la cima universitaria que suponía el puesto de *professor* (catedrático), aunque aun así tal vez podría desarrollar una carrera científica, como habían hecho, por ejemplo, Lise Meiter o Herta Sponer. De hecho, como veremos en este mismo capítulo, aunque las posibilidades al respecto eran *algo* mejores que en Alemania (no hay que olvidar los sentimientos en contra que encontró Herta Sponer de que una mujer – más aún una mujer *extranjera* – entrase a formar parte de un departamento universitario de física), su situación particular se vería agravada por las normas antinepotismo que regían en muchas universidades norteamericanas, que impedían que se contratase a una mujer si su marido ya formaba parte de la institución (el caso inverso era imaginable entonces).

Mas para situar en una perspectiva adecuada la biografía de María Goeppert Mayer una vez que se instaló en Estados Unidos, es necesario considerar antes la situación de la ciencia en este país.

Cuando María Goeppert Mayer abandonó Europa en marzo de 1930 a bordo del transatlántico *SS Europa*, en compañía de su esposo y de Kate Mayer, no podía ignorar que se iba a enfrentar a un mundo muy diferente del en numerosos aspectos bastante cerrado y desde luego elitista, aunque lo fuese en “lo intelectual”, que predominaba en Göttingen.

Ciencia en Estados Unidos

Caracterizar a una nación mediante una frase es tarea harto temeraria y en general condenada al fracaso, pero si nos viéramos forzados a emplear una en el caso de Estados Unidos, muchos recurrirían a dos palabras: *naturaleza práctica*. No hace falta, en efecto, conocer muy bien la historia de esa nación para toparse con numerosos ejemplos que muestran las inclinaciones prácticas – y pragmáticas – de sus ciudadanos, acaso por la dificultad que éstos (muchos de ellos emigrantes procedentes del Viejo Continente) encontraban en el Ochocientos para abrirse camino en un país de tan enormes dimensiones.

La colonización del oeste fue una de las fuerzas sociales, al igual que una fuerza económica, que dominó el periodo anterior a la Guerra Civil (1861-1865). Para facilitar la expansión hacia territorios apenas conocidos, y también para mejorar el conocimiento de los ya habitados, el Gobierno Federal se vio en la necesidad de apoyar trabajos en astronomía, hidrografía, geofísica, magnetismo terrestre, meteorología, estudios topográficos, geología, botánica, zoología y antropología. Estas disciplinas, indispensables para conocer la geografía física y humana de la nación, fueron las únicas apoyadas entonces por el Gobierno. Como ha señalado Hunter Dupree, el gran estudioso de la ciencia y el Gobierno Federal: “las ciencias en las que predominaba el trabajo de laboratorio, en las que los descubrimientos se realizaban en tubos de ensayo en lugar de en distantes montañas, no se encontraban entre los intereses del Gobierno”.

Es representativo que los orígenes de una organización como la American Association for the Advancement of Science mostrase también este tipo de intereses. En 1840, diez geólogos, la mayoría vinculados a los servicios topográficos y agrimensores estatales, se reunieron en Filadelfia para constituir una Association of American Geologists, que dos años después adoptaba el nombre de Association of American Geologists and Naturalists. En 1848, esta organización, ya más numerosa, cambiaba su nombre adoptando una nueva constitución basada en la de la británica British Association for the Advancement of Science. Esta recién denominada American Association for the Advancement of Science, que inicialmente

contaba con sólo dos secciones (una dedicada a “física general, matemática, química, ingeniería civil y ciencias aplicadas en general”, y otra a “historia natural, geología, fisiología y medicina”), se convirtió rápidamente, al igual que sus hermanas de otras naciones, en un importante lugar de reunión de los científicos estadounidenses. En 1848 tenía 461 miembros; en 1854 el número había ascendido a 1.004.

En medio de la Guerra Civil el Congreso pasó una ley estableciendo una National Academy of Sciences, que firmó el presidente Abraham Lincoln el 3 de marzo de 1863. En la mente de muchos de sus promotores estaba la idea de que la nueva institución sirviera de puente entre la ciencia nacional y el Gobierno Federal, o que fuese un delegado de este último. Pero tales ambiciones no se cumplieron: la Academia sirvió como instrumento de reconocimiento de méritos científicos, pero no como centro de poder o de patronazgo. No publicaba ninguna revista de manera regular, sus reuniones eran poco frecuentes y pocas personas asistían a ellas; además, y probablemente causa de lo anterior, manejaba un presupuesto muy limitado.

En general, el período que va de la creación de la National Academy of Sciences hasta el comienzo de la Primera Guerra Mundial en 1914, se puede describir como de un crecimiento moderado – aunque significativo – de la ciencia en Estados Unidos, sin ayudas significativas de fondos públicos y sin la existencia de ningún tipo de planificación federal.

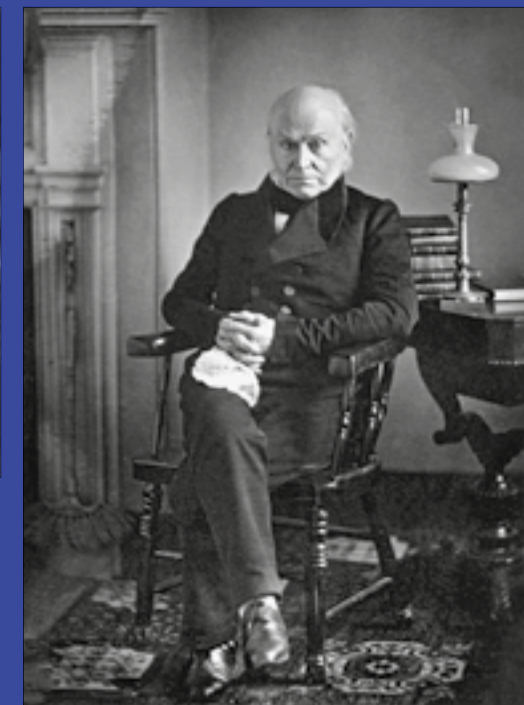
Una disciplina en la que se puede apreciar con cierta claridad el lento pero al fin y al cabo progresivo avance durante el siglo XIX de la ciencia estadounidense, es la astronomía (por otra parte una ciencia también *útil* y por consiguiente favorecida en América; se la necesitaba para la agrimensura y también para ayudar a mantener un servicio horario y calendario). En 1825, John Quincy Adams accedía a la presidencia de los Estados Unidos, y en su primer mensaje anual al Congreso realizó una de las defensas de la ciencia más rotundas nunca realizadas por un presidente estadounidense. Entre otros puntos señaló que, como americano, no podía sentir ningún orgullo en el hecho de mientras Europa podía ufanarse de poseer 130 “faros de los cielos”, no existiese ninguno en todo el hemisferio norteamericano. Tenía razón: en 1839, por ejemplo, Harvard – todavía nada más que un *college* – no disponía de fondos para adquirir aparatos astronómicos capaces de observaciones que mereciesen la pena. Cuando en 1843 la ola de consultas recibidas sobre el cometa aquel año visible revelaron públicamente las deficiencias de la observación astronómica, en Cambridge, Massachusetts, tuvo lugar una reunión de ciudadanos, presidida por el magnate textil Abbot Lawrence, para intentar subsanar tal carencia municipal. Fruto de aquella iniciativa fue la construcción en 1847 de un espléndido observatorio astronómico, al que se le dotó de un telescopio que costó 20.000 dólares. Es significativo que la pieza más importante de ese telescopio, la lente, se tuviera que fabricar en Alemania.

Al aproximarse el fin del siglo la física y la química ya se cultivaban lo suficiente como para que se fundasen asociaciones profesionales. En 1876 se creó la American Chemical Society, aunque por entonces esta sociedad no pasaba de ser una más de entre las varias que se ocupaban de la química, sirviendo esencialmente a los intereses de los químicos del área de Nueva York. Inicialmente, el número de sus miembros creció, pasando de 230 el año de su fundación a 314 en 1881, pero poco tiempo después disminuyó alcanzando un mínimo de 204 en 1889. Una serie de reformas culminaron en una reorganización en 1892, año en el que se puede decir que la American Chemical Society se convirtió en una asociación auténticamente nacional. En 1895 ya contaba con 903 miembros, 1.715 en 1900. En 1901 tenía 13 secciones locales, de las cuales al menos seis celebraban reuniones mensuales y el número de socios crecía rápidamente, 2.919 en 1905, 5.081 en 1910 y 7.170 en 1914, cifras que dan idea de la expansión que estaba experimentando el mercado de trabajo para los químicos, un mercado copado fundamentalmente por la industria química, aunque también el Gobierno Federal respondía a ese crecimiento empleando más químicos: en 1901 daba trabajo a 22 químicos, 12 de ellos en el Departamento de Agricultura, que aumentaron a 32 (15 en Agricultura) en 1905; en 1911 la cifra ya había ascendido a 292, de los que Agricultura todavía se llevaba la mayoría, 204; pero en 1916 ya se les necesitaba en más ámbitos de la ciencia, duplicándose el número, 716, de los que 397 trabajaban para Agricultura.

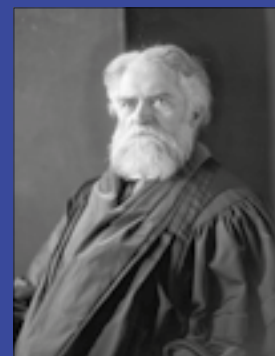
Los físicos se organizaron un poco más tarde, un detalle que puede entenderse como una demostración de que no eran tan útiles a la nación como los químicos. Hasta el último tercio del siglo XIX las figuras más destacadas de la física norteamericana fueron Benjamín Franklin y Joseph Henry, que realizaron contribuciones importantes a la electricidad y el electromagnetismo; al primero se le recuerda especialmente por inventar el pararrayos y entre las contribuciones del segundo se encuentran sus aportaciones a la telegrafía. Fue Arthur Gordon Webster, profesor de la Clark University, que se había graduado en Harvard y obtenido su doctorado con Hermann von Helmholtz en Berlín, quien reconociendo la ineficacia de la National Academy of Sciences, al menos para la física, lanzó la idea de una American Physical Society en 1899. Ese mismo año, 38 físicos, entre los que se encontraban las tres luminarias de la física norteamericana de la época, a saber, Henry A. Rowland (Johns Hopkins), que sería elegido presidente, Albert A. Michelson (Universidad de Chicago; fue, recordemos, el primer estadounidense en recibir el Premio Nobel de Física, lo obtuvo en 1907 “por sus instrumentos ópticos de precisión y las investigaciones metrológicas y espectroscópicas que desarrolló con su ayuda”), y Josiah Williard Gibbs (Universidad de Yale, cuyos trabajos en termodinámica y mecánica estadística resultaron fundamentales para estas disciplinas), se reunieron en la Universidad de Columbia, en Nueva York, para establecer formalmente la organización. Y aunque la física estadounidense llegaría a alcanzar el liderazgo mundial a lo largo del siglo XX, un siglo en el que esa disciplina logró más descubrimientos fundamentales en la comprensión de la



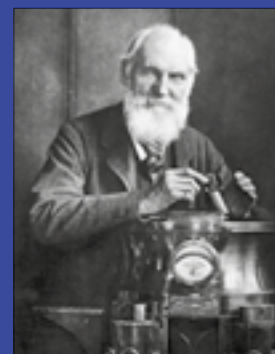
Benjamin Franklin extrayendo electricidad del cielo, Benjamin West, Museo de arte de Filadelfia, c. 1816



John Quincy Adams, presidente de Estados Unidos. Daguerrotipo de Philip Haas, 1843.



Simon Newcomb (1905)



Lord Kelvin (1902)



Harvard University (College), c. 1638

Henry A. Rowland



naturaleza que cualquiera de las restantes ciencias naturales, en lo que se refiere a la dimensión profesional (lo que quiere decir también, al menos en cierta medida, en lo que se refiere a su “aplicabilidad social”), la química fue por delante de la física.

Que así era, se puede comprobar comparando el número de miembros de la American Physical Society con el de la American Chemical Society. En 1909 la sociedad de físicos contaba con 495 miembros, frente a los 4.502 que tenía ese mismo año la de los químicos. En 1914 la sociedad de físicos superaba los 700 miembros (3.600 en 1939), frente a los 7.170 (23.519 en 1939) de la American Chemical Society.

Para entender el “despegue” de la física y química estadounidenses a comienzos del siglo xx hay que tomar en cuenta a su industria y comercio. Las manufacturas aportaban un 30 por ciento más a la renta nacional que la agricultura y la minería juntas. Las exportaciones sobrepasaron por primera vez los mil millones de dólares, superando además, por primera vez también, a las importaciones. Al igual que en otras naciones, el conocimiento científico era necesario para mantener este desarrollo, y así lo percibían los norteamericanos que, ante el ejemplo de alemanes e ingleses, solicitaron al Gobierno el establecimiento de un laboratorio nacional que se ocupara de trabajos de homologación y normalización, que la industria necesitaba. El 3 de marzo de 1901 se aprobaba una ley por la que se creaba el National Bureau of Standards.

La industria privada reaccionó antes y con mayor amplitud que el Gobierno Federal ante el valor que la ciencia mostraba para la tecnología (esto es, para los negocios). Thomas Edison (bien conocido por inventar el fonógrafo y la bombilla), no obstante sus limitaciones personales (era un inventor hecho a sí mismo, sin una instrucción sistemática), fue uno de los primeros en darse cuenta, al menos parcialmente, de que sus negocios necesitaban de la ciencia, y en el espléndido laboratorio que construyó entre 1886 y 1888 en West Orange, New Jersey, Menlo Park, reunió un plantel de colaboradores que, aunque probablemente lejos de estar equilibrado, incluía un físico especializado en electricidad, químicos que habían obtenido sus doctorados en Alemania y varios antiguos estudiantes que habían asistido a *colleges* en los que la ciencia ocupaba un lugar preferente. Durante la primera década del siglo xx unas cuantas firmas de la industria química (en especial Du Pont, en 1902, y Standard Oil de Indiana) abrieron genuinos laboratorios de investigación. (El primer director del laboratorio de Du Pont, en Repauno, New Jersey, fue Charles Reese, un químico formado en Heidelberg. Análogamente, cuando Eastman Kodak fundó su laboratorio en Rochester, Nueva York, en 1913, el director fue el químico C. E. Kenneth Mees, que había estudiado en Londres.) A principios de siglo, el presidente de la American Chemical Society podía manifestar con satisfacción: “Todavía no podemos jactarnos como los alemanes de que un único trabajo emplea a más de 100 químicos completamente

formados [...], pero la mayoría de los trabajos más importantes tienen equipos de entre 10 y 50 químicos.

La misma reacción se produjo en la industria eléctrica y de comunicaciones, donde el valor de la mercancía manufacturada pasó de 19 millones de dólares en 1889 a 335 millones en 1914. Al inicio de la nueva centuria, en 1900 y 1904, respectivamente, los laboratorios de General Electric (GE) y American Telephone and Telegraph (ATT), que hasta entonces sólo habían estado dedicados a trabajos de rutina, se habían transformado en centros de investigación y desarrollo. (Para dirigir el laboratorio de Schenectady, Nueva York, GE contrató a Willis Whitney, que había obtenido su doctorado en Leipzig). De hecho, el mercado de la iluminación eléctrica estaba completamente abierto a las innovaciones desde que en 1838 el belga J. B. A. M. Jobard desarrollase un filamento de carbón en el vacío, iniciando la historia de la lámpara incandescente, y por ello las industrias que se dedicaban a este sector tuvieron que recurrir a físicos, algunos de los cuales estaban aprovechando este campo para demostrar sus habilidades, como demuestra el ejemplo del químico-físico alemán Walther Nernst (entre cuyos logros se encuentra el denominado “tercer principio de la termodinámica”) quien inventó en 1904 una bombilla de filamento cerámico, cuya patente vendió obteniendo un importante beneficio económico (un millón de marcos; la bombilla, sin embargo, no fue un éxito). Con los físicos contratados (como por ejemplo Irving Langmuir, que había obtenido su doctorado con Nernst), General Electric se dedicó a mejorar las lámparas de wolframio, y ATT a desarrollar nuevas lámparas de vacío. Y tuvieron bastante éxito: en GE lograron una lámpara de wolframio más duradera, eficiente y barata que cualquier otra lámpara incandescente existente en el mercado, con lo que la compañía pasó de un 25 por ciento del mercado a dominar con un 71 por ciento en 1914. En ATT lograron desarrollar un amplificador de vacío muy eficaz, que era imprescindible para la extensión del servicio telefónico a grandes distancias.

Al principio hubo que vencer la resistencia de los científicos (de los más creativos, sobre todo), acostumbrados a la idea de que su destino era el mundo universitario. Frank Jewett, que llegaría a ser presidente de los laboratorios Bell (fundados en 1925 y que se convirtieron en los laboratorios más famosos y más productivos de la industria basada en la ciencia de todo el mundo), recordaba que cuando comenzó a trabajar para la industria, su mentor, el premio Nobel de Física Albert Michelson, pensó “que estaba prostituyendo mi formación y mis ideales”.

Los Bell Telephone Laboratories fueron creados como una compañía subsidiaria de ATT y Western Electric; ya en 1911 la Bell System, espoleada por la necesidad de desarrollar la telefonía a largas distancias y de responder al desafío planteado por la radio, había creado su propia rama de investigación. ATT autorizaba y pagaba por la investigación básica, mientras que Western Electric autorizaba y pagaba por el desarrollo de la tecnología aplicable a sus productos. Durante

su primer año de vida, los laboratorios Bell emplearon a 3.600 personas, de las cuales 2.000 eran técnicos, y tenía un presupuesto de 12 millones de dólares. Sus investigadores trabajaban en radio, electrónica, química, magnetismo, óptica, matemáticas aplicadas, sonido, transformación de energía entre sistemas eléctricos y acústicos, generación y modificación de corrientes eléctricas, instrumentación, pinturas y problemas relativos al envejecimiento y preservación de la madera, para los postes telefónicos, por supuesto.

Y cuando GE intentó contratar a Willis R. Whitney, entonces en el Massachusetts Institute of Technology, para que dirigiese su laboratorio de investigación, tuvo que prometerle que podría dividir su tiempo entre GE y el instituto tecnológico ubicado en el Cambridge norteamericano. Pronto, sin embargo, Whitney quedó absorbido (material e intelectualmente) por los problemas que su nuevo trabajo le planteaba. Su experiencia fue compartida por muchos otros científicos, pudiéndose decir que entre 1910 y 1920 la investigación industrial se consolidó como una ocupación atractiva para los científicos estadounidenses. Aunque, como hemos visto, existían precedentes para este tipo de actuación profesional, especialmente en Alemania y en la química de los colorantes, fue en Estados Unidos en donde más se extendieron, diversificaron y afianzaron los laboratorios de investigación, terminando de inaugurar de esta manera una etapa en la historia de la ciencia y la tecnología que lejos de decaer no fue sino intensificándose a lo largo del siglo xx.

Una buena idea de cómo fueron creciendo los laboratorios de investigación industriales la proporciona las siguientes cifras. El laboratorio de investigación de ATT aumentó su plantilla de 23 trabajadores en 1913 a 106 en 1916, y su presupuesto de 71.000 a 249.000 dólares. Cuando en 1916 el laboratorio de GE se trasladó a un nuevo emplazamiento contaba con las mejores facilidades de investigación en física del país. Antes de la Primera Guerra Mundial, los físicos que trabajaban en laboratorios industriales constituían únicamente una décima parte de los afiliados a la American Physical Society; en 1920, sin embargo, ya constituían un cuarto, y ello teniendo en cuenta que el número de miembros de la sociedad se había duplicado. La proporción de artículos publicados procedentes de laboratorios industriales (que, recordémoslo, no publicaban todos sus resultados) en la principal revista de física del país, *Physical Review*, mostró un aumento parecido: 2% en 1910, 14% en 1915 y 22% en 1920. Veinte años después de la creación del laboratorio de investigación de GE, más de 500 empresas norteamericanas habían creado centros de investigación.

Ciencia en las universidades

Pasando ahora al hogar principal – o al menos el tradicional – de la ciencia, las universidades, encontramos que el sistema educativo superior estadounidense se caracterizaba – y continúa caracterizándose – por ser privadas la mayoría de las

universidades, al menos las más prestigiosas como, restringiéndome a las más antiguas, Harvard (Cambridge, Massachussets; fundada en 1636), Yale (New Haven; 1701), Pennsylvania (Filadelfia; 1740), Princeton (1751), Columbia (Nueva York; 1754), Johns Hopkins (Baltimore; 1875), Cornell (Ithaca; 1865) o Chicago (1890). Como se puede observar, estas universidades están situadas en la costa este de Estados Unidos, por la razón obvia de que fue allí donde primero comenzó la “colonización” – y el desarrollo – de la nación; la costa oeste se incorporó más tarde a este desarrollo, hacia comienzos del siglo xx. (Las fechas citadas para la fundación de las universidades antes mencionadas deben tomarse con precaución; en general lo que indican es que su origen se remonta a esa fecha, cuando normalmente se creó un *college* del que con el tiempo surgiría la universidad en cuestión).

Como se ha explicado en el apartado anterior, a comienzos del siglo xx el mercado de puestos de trabajo relacionado con la ciencia y la tecnología, con la física y la química, en particular, crecía espectacularmente en Estados Unidos, lo que supuso la llegada de cada vez más estudiantes a las universidades para educarse en esos campos. Así, entre 1890 y 1915 las universidades estadounidenses concedieron unos 200 doctorados en matemáticas, 300 en física y 500 en química, aproximadamente diez veces más que los otorgados en cada una de esas disciplinas en el cuarto de siglo precedente. La mejora de las ciencias físico-químicas en el mundo universitario estadounidense llegó a ser de tal orden que en 1910-1911 el ministro de Educación de Prusia estimaba que doce universidades, públicas y privadas, estadounidenses se podían comparar en calidad con las veintiuna existentes en Alemania. En cuanto a financiación, los centros americanos superaban claramente a los germanos: mientras que el presupuesto anual medio de una universidad alemana era de 1,76 millones de marcos, el de una estadounidense era de 5,8 millones. Los gastos norteamericanos por universidad se habían cuadruplicado desde mediados de la década de 1890, mientras que en Alemania únicamente se habían doblado. Es cierto que las universidades estadounidenses prestaban especial atención a la educación general, pero como acabamos de ver ya existían también programas de postgrado. En suma, Estados Unidos comenzaba a amenazar a Alemania desde el lado de la educación.

Por otra parte, los poseedores de grandes fortunas habían comenzado a principios de siglo a interesarse por la ciencia, incluyéndola en sus aportaciones filantrópicas. Así, en 1901 se estableció el Institute for Medical Research, en Nueva York, financiado por el millonario John D. Rockefeller (en 1956 este Instituto se constituyó en Universidad: la Rockefeller University), y en 1902 el industrial de origen escocés Andrew Carnegie creó la Carnegie Institution, en Washington, D. C. Ambas manejaron durante sus primeros años un capital de unos 10 millones de dólares, lo que significaba que producían intereses equivalentes al presupuesto de una de las mayores universidades alemanas. Mientras que el centro auspiciado por Rockefeller se concentró en la biomedicina, el Carnegie proporcionó ayudas a investigadores “excepcionales” en cualquier campo. Fue, sin embargo, a partir de la

Primera Guerra Mundial cuando se intensificó realmente la ayuda de las grandes fundaciones a las ciencias físico-químicas.

Sin duda alguna, la ciencia estadounidense comenzaba a progresar rápidamente. Si nos fijamos, por ejemplo, en el dinero que se invertía en el ámbito de la física, acaso sorprendentemente para muchos, era Estados Unidos la nación que más invertía: entre 1,5 y 3 veces más de lo que dedicaban, por separado, Alemania, Gran Bretaña y Francia. Y la distancia iba aumentando: las inversiones estadounidenses crecían al ritmo de un 10 por ciento anual, mientras que las alemanas y británicas lo hacían al 5 por ciento; a un 2 por ciento las francesas. Estas cantidades son significativas, y ayudan a comprender la situación de hegemonía mundial que posteriormente alcanzaría la ciencia de Estados Unidos, al margen de “ayudas” como el exilio hacia el nuevo mundo de científicos centroeuropeos (alemanes y austriacos especialmente) debido al antisemitismo nazi. No andaba muy descaminado el astrónomo Simon Newcomb, presidente del Congreso de Artes y Ciencia que se celebró con ocasión de la Exposición Universal de San Luis de 1904, y que reunió a científicos europeos de la talla de Henri Poincaré, Wilhelm Ostwald, Ludwig Boltzmann, Ernest Rutherford o Paul Langevin, cuando en su alocución inaugural, y entre la retórica habitual, señalaba:

“Señores, sabios todos:

No visitan nuestras tierras para encontrar grandes colecciones en las que, en lienzo o mármol, se resumen las esperanzas, temores y aspiraciones de siglos de historia. Ni esperan Vds. hallar instituciones y edificios ennegrecidos por el tiempo. Pero al sentir el vigor latente en el aire fresco de estas grandes praderas, que han reunido los productos del genio humano que hoy nos rodean aquí y que, me gustaría añadir, también ha hecho posible que nos reunamos; al estudiar las instituciones que hemos fundado para el beneficio, no sólo de nuestro pueblo, sino de toda la humanidad; al encontrarse con los hombres que en el corto espacio de un siglo han transformado este valle, de su salvaje soledad inicial a lo que es hoy; al apreciar todo esto, digo, podrán encontrar compensación en la ausencia de un pasado como el suyo, contemplando con visión profética la potencia mundial que será esta región.”

Una anécdota final. Antes de ir a St. Louis, Boltzmann pasó el verano en la Universidad de California, en Berkeley, como parte de los esfuerzos por modernizar aquella institución. Más tarde Boltzmann reunió sus impresiones sobre América en *Reise eines deutschen Professors ins Eldorado* (incluido en sus *Populare Schrifthen*, publicado en 1905), donde se puede leer: “América logrará grandes cosas. Creo en esta gente, incluso aunque he observado en ellos ciertas torpezas, como cuando tratan con el cálculo integral y diferencial en un seminario de física teórica. Lo hacen más o menos igual de bien que yo cuando salto zanjas y subo y bajo colinas, actividades que uno no puede evitar en el campus de Berkeley”.

La introducción de la mecánica cuántica en Estados Unidos

Un punto importante en el desarrollo y establecimiento de la ciencia estadounidense se encuentra en las visitas que realizaron físicos europeos a Estados Unidos para dictar conferencias y cursos, así como en las estancias de los norteamericanos en universidades de Europa para ampliar allí sus conocimientos. De entre las visitas tempranas de científicos europeos mencionaré la del irlandés John Tyndall en 1872-1873 para pronunciar una serie de conferencias populares; la de William Thomson (más tarde lord Kelvin) en 1884, donde desarrolló un curso de veinte conferencias en la Universidad Johns Hopkins, que dio lugar al famoso libro *Baltimore Lectures on Molecular Dynamics: the Wave Theory of Light* (Londres, 1904); y la de J. J. Thomson (director del Laboratorio Cavendish de Cambridge) en 1896, para participar en las celebraciones del 150 aniversario de la fundación de la Universidad de Princeton, visita que aprovechó para dictar cuatro conferencias sobre la conductividad de la electricidad en gases, publicadas poco después como *The Discharge of Electricity Through Gases* (Nueva York, 1898). Ahora bien, habida cuenta de que la física cuántica constituía el mundo científico propio de María Goeppert Mayer, es necesario preguntarse cuáles fueron los caminos a través de los que los conocimientos cuánticos llegaron a Estados Unidos antes de que ella lo hiciese en 1930.

Con anterioridad a la elaboración de la teoría de la mecánica cuántica de Heisenberg-Schrödinger-Dirac (1925-1926), tres físicos especialmente respetados en Europa, Hendrik Antoon Lorentz, Max Planck y Wilhelm Wien, pronunciaron conferencias en la Universidad de Columbia (Nueva York) en 1906, 1909 y 1913, respectivamente. Asimismo, como se mencionó en el capítulo 1, Max Born estuvo en la Universidad de Chicago, invitado por Abraham Michelson, en 1912. Allí, dio una serie de conferencias sobre relatividad. Es interesante citar parte de lo que en su autobiografía recordó sobre este viaje, puesto que refleja no solo sus impresiones y el contraste entre la vieja Europa y la joven América, sino que también ofrece datos interesantes acerca del estilo científico de Michelson:

“Casi todos los científicos británicos actuales han estado en algún momento en Estados Unidos, pero esto no sucedía en Alemania antes de la Primera Guerra Mundial. Muy pocos de mis colegas [alemanes] habían cruzado el Atlántico. De mi círculo, solo Max Abraham había estado allí, pasando algunos años en la Universidad Estatal de Illinois en Urbana, pero no le gustó el modo de vida americano y había regresado. De manera que fue toda una aventura para mí realizar ese viaje en abril de 1912. Me embarqué en Bremen en uno de los rápidos buques de vapor alemanes [...].

Aunque me agradó la grandeza de los rascacielos de Manhattan y la turbulenta vida de la ciudad, me disgustó el chocante contraste social entre los ricos y los pobres. Vi a éstos en los atestados barrios del Eastside y de Harlem. Por otra parte, visité a algunas ricas familias en sus bellas casas cerca de Central Park. La

Un punto importante en el desarrollo y establecimiento de la ciencia estadounidense se encuentra en las visitas que realizaron físicos europeos a Estados Unidos para dictar conferencias y cursos, así como en las estancias de los norteamericanos en universidades de Europa para ampliar allí sus conocimientos.

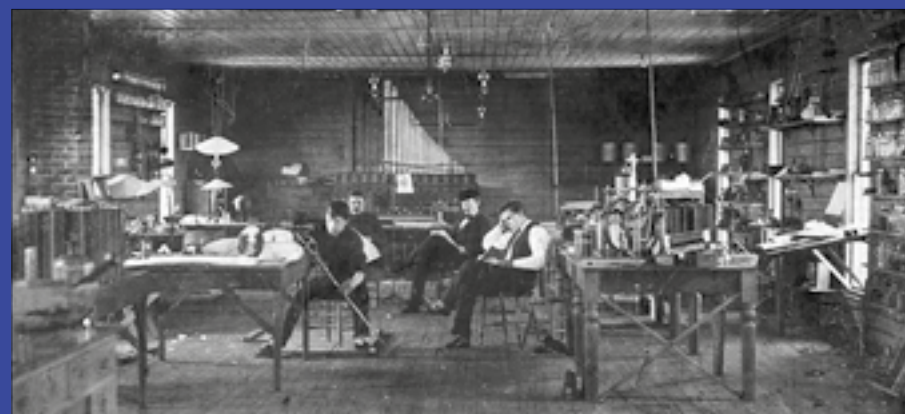
mayoría de estas familias eran de grandes médicos judíos, para los que llevaba presentaciones de amigos de mi padre, por ejemplo del anciano Ehrlich [...].

De Nueva York fui directamente a Chicago y permanecí algunas semanas en la encantadora casa de Michelson. Después me trasladé a una habitación en una de las residencias de estudiantes. Era uno de los lugares más miserables en los que he estado jamás, únicamente comparable con los barracones militares alemanes [...]. Cuando viajé al norte, en julio, para visitar a la señora Michelson y a sus hijos en su casa de verano en el lago Michigan, encontré lujosa mi litera en el tren comparada con la sucia y nada confortable cama en mi habitación de la residencia [...].

Otro viaje que hice desde Chicago me llevó a las cataratas del Niágara y a Toronto en Canadá.”

Poco antes de dejar Chicago, asistió, “en una sala colosal”, a la Convención del Partido Republicano para la nominación del próximo presidente de Estados Unidos. “El candidato más fuerte era – decía Born – Theodore Roosevelt, el primero de este nombre”. “El disparado procedimiento de estas convenciones – añadía – ha sido descrito bastante, pero no creo que nadie que no lo haya visto pueda imaginar el pandemonio. Las paredes estaban cubiertas de grandes imágenes de los candidatos, principalmente de Roosevelt, y de cabezas de elk [una variedad de alce], su emblema. Varias bandas tocaban a veces diferentes melodías simultáneamente.” A continuación realizó un tour por Estados Unidos antes de regresar a Europa. Particularmente interesante es lo que escribió sobre Michelson:

“Mi trabajo en Chicago consistía en dar clases sobre la teoría de la relatividad a un grupo de estudiantes de investigación y de jóvenes miembros del claustro [...]. También trabajé un poco en el laboratorio. Michelson me dio una de sus maravillosas rejillas cóncavas y me enseñó cómo usarla. Pasé así horas agradables focalizando, observando y fotografiando espectros de muchas sustancias, y era feliz cuando obtenía una placa que Michelson aprobaba. Pero él solo estaba interesado en la técnica de producir fotografías sin defectos y apenas en el significado de todas las líneas y bandas que se veían en las placas. Yo no podía dejar de observar numerosas regularidades, en particular en el espectro de arco



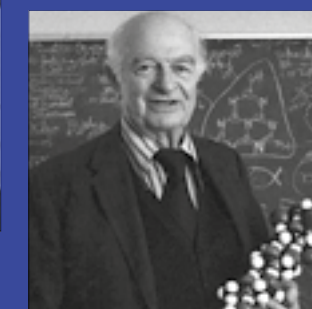
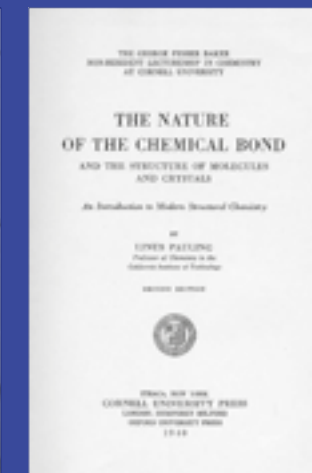
Thomas Edison y su laboratorio en Menlo Park



Hendrik A. Lorentz en la Universidad de Wisconsin (1922)



Norbert Wiener y Max Born



Portada de la obra canónica de Linus Pauling y retrato del autor en la época final de su vida

del carbono y pregunté a Michelson si conocía una explicación. Su reacción fue muy curiosa. En una de las bandas que me parecía obvio seguían una ley sencilla [...] él me enseñó la existencia de irregularidades, que consistían en líneas que estaban desplazadas de las posiciones donde deberían haber estado, y dijo: ‘¿Piensa usted realmente que existe una sencilla ley detrás de ella si suceden horribles cosas como estas?’ No sé si pensaba que la naturaleza actúa de forma azarosa, pero desde luego no estaba interesado en el secreto de detrás de estos fenómenos. De hecho, el primer paso en la dirección de levantar la cortina ya se había dado, como supe pronto, con el establecimiento de la fórmula de Deslandre para bandas sencillas, que finalmente condujo a la explicación de sistemas de bandas complicadas, incluyendo aquellas aparentes irregularidades”.

Michelson, en otras palabras, al igual que la mayoría de los físicos estadounidenses de entonces (la principal excepción era Josiah Willard Gibbs, que había fallecido en 1903), se ocupaba básicamente de la experimentación, no involucrándose en qué sistema teórico podía dar sentido a los resultados experimentales obtenidos. Y no hay que olvidar que uno de los motores que llevaron a la formulación de la mecánica cuántica fue precisamente elaborar una teoría que explicase las posiciones de las rayas de los espectros que se obtenían de los diversos elementos químicos.

Tras la Primera Guerra Mundial se reanudó el flujo de visitantes europeos a Estados Unidos. A comienzos de 1922, Hendrik Lorentz volvió a América para dar en el California Institute of Technology un curso sobre problemas de física moderna, que aparecería publicado con el mismo título, *Problems of Modern Physics* (Boston) en 1927, preparado por el físico matemático inglés, instalado en Caltech desde 1917, Harry Bateman. A través de él sabemos que Lorentz abordó, entre otros temas, un buen número de cuestiones de la que podemos denominar “vieja teoría cuántica”, desde el átomo de Rutherford-Bohr hasta el movimiento de los cuantos en haces de luz que se superponen, pasando por el principio de complementariedad introducido por Niels Bohr. También estuvo en Caltech, pasando todo el año académico 1922-1923, el físico británico Charles Galton Darwin, autor de notables aportaciones a la física cuántica. Entre septiembre de 1922 y abril de 1923, Arnold Sommerfeld circuló por diversos centros (Wisconsin, Urbana en Illinois, y el National Bureau of Standards). Entre octubre y diciembre de 1923 Niels Bohr visitó varias universidades: Amherst College, Harvard, Nueva York, Princeton, Yale (*Silliman Lectures*), Chicago y Ann Arbor. Peter Debye pasó el semestre de primavera de 1924 en el Massachusetts Institute of Technology (MIT). Aquel mismo año (1924), Paul Ehrenfest, Arthur Eddington y Hendrik Lorentz también viajaron a Estados Unidos.

Aparte del interés que podía tener conocer el ya pujante “nuevo mundo”, un importante estímulo para que físicos europeos notables viajaran a Estados Unidos era la compensación económica que podían conseguir en algunos casos. Así, por

ejemplo, Bohr recibió 3.000 dólares del Amherst College y 1.250 de Yale, mientras que Sommerfeld obtuvo 4.000 dólares por el semestre que pasó en Wisconsin. Habla por sí sola la carta que Hedwig, esposa de Max, envió a Einstein el 2 de octubre de 1920: “Mi esposo siente inclinación a matar al becerro de oro en América y ganar lo suficiente dando conferencias como para construirnos una pequeña casa en Gotinga, según sus propias especificaciones. Si por casualidad tiene usted la oportunidad de recomendar a alguien para dar conferencias allí, por favor sugiera a Max. Le sería posible ir allí en febrero, marzo y abril”.

De hecho, fue Max Born el primero que, en 1925, llevó a América las noticias de la nueva teoría cuántica, la mecánica de matrices de Heisenberg. El 2 de noviembre de 1925, acompañado de su esposa, Born partía de Gotinga con destino al Cambridge estadounidense, para ofrecer en el MIT un curso, que comenzó el 14 de noviembre. María Goeppert iniciaba por entonces sus estudios de física.

“Mis conferencias en el Massachusetts Institute of Technology – escribó Born en sus memorias – contuvieron en la primera parte un esbozo de la dinámica de cristales, y en la segunda los elementos de la mecánica cuántica. Fue la primera presentación sistemática de este nuevo campo. Cuando comencé estas conferencias el artículo mío y de Jordan, en el que se introducía el cálculo de matrices, estaba todavía en prensa, y el gran artículo de los tres hombres [el conocido como *Drei-Männer Arbeit*], de Heisenberg, Jordan y yo mismo, apareció justo al final del curso”.

Por consiguiente, fue la versión matricial (Heisenberg) de la mecánica cuántica la primera teoría que se conoció en Estados Unidos. No es sorprendente que Born no dijera nada de la formulación ondulatoria – que desconocía – pues el primer artículo que Erwin Schrödinger publicó sobre ella, “Quantisierung als Eigenwertproblem” (“Cuantización como un problema de valores propios”), llegó a la redacción de *Annalen der Physik* el 27 de enero de 1926. Lo que Born sí conocía era la formulación de Paul A. M. Dirac. “El día antes de dejar Gotinga – explicó Born a Thomas S. Kuhn en una entrevista que le hizo el 17 de octubre de 1962 (la transcripción está depositada en la Niels Bohr Library del American Institute of Physics) – llegó un paquete de artículos de Dirac, cuyo nombre no había oído nunca. Y contenía exactamente lo mismo que estaba en mi artículo con Jordan. Al estudiarlo comprobé que nosotros lo escribimos cuatro semanas antes que él, pero no era así en lo que se refiere a la publicación. Me quedé absolutamente sorprendido. Nunca había estado tan sorprendido en toda mi vida, que un completamente desconocido y aparentemente joven pudiera escribir un artículo tan perfecto. Pero no sabía quién era. Solamente medio año después, cuando fui a Inglaterra, lo conocí”.

Durante su estancia en el MIT, Born conoció a un entonces joven Norbert Wiener (1894-1964), que más tarde se haría famoso al idear una nueva ciencia, la cibernética. Wiener era uno de los asistentes a las conferencias de Born y llamó

la atención de éste al argumentar que las matrices de la mecánica cuántica propuesta por Heisenberg, y desarrollada con la ayuda del propio Born y de Pascual Jordan, podían ser consideradas como operadores (una entidad matemática) que actuaban sobre vectores en espacios multidimensionales, y sugiriendo generalizar la mecánica cuántica matricial convirtiéndola en una especie de mecánica de operadores. Desarrollaron juntos la idea, publicando un artículo (“A new formulation of the laws of quantization of periodic and aperiodic phenomena”) que apareció en el número de enero de 1926 de la revista *Journal of Mathematics and Physics* (también se publicó en alemán en *Zeitschrift für Physik*). Fue el primer artículo en Estados Unidos sobre la nueva mecánica cuántica.

También mientras permaneció en el Cambridge norteamericano, y con la intención de ganar algún dinero, puesto que, según él, los honorarios que recibía en el MIT no eran suficientes para cubrir sus gastos, Born preparó un libro (lo escribió en alemán y lo tradujeron los ayudantes que tenía asignados para el curso), que apareció en 1926 como una publicación del MIT, titulado *Problems of Atomic Dynamics*. En el “Prefacio” Born explicó que su contenido era exactamente, sin ningún añadido, lo que había presentado en el curso. “Las clases – añadía – no pretendían constituir un libro de texto – de estos tenemos suficientes – sino más bien una exposición del estado actual de la investigación en aquellas regiones de la física en las que yo mismo he realizado investigaciones y de las cuales, por consiguiente, creo que puedo ofrecer una visión comprehensiva. El poco tiempo del que dispuse, no me permitió aspirar a completitud ni detenerme en minucias. Mi propósito fue presentar métodos, temas de investigación y los resultados más importantes. He evitado referencias y solo ocasionalmente he nombrado autores individuales”.

El curso de Born fue un éxito, al menos eso se deduce del hecho de que a su última clase, el 22 de enero de 1926, asistieran 1.000 personas. Edwin Kemble, entonces un joven profesor de la cercana Universidad de Harvard manifestó en una reseña del libro *Problems of Atomic Dynamics*, publicada en *Physical Review* (1926): “Es una feliz experiencia para los físicos americanos que el Profesor Born haya pronunciado estas conferencias sobre dinámica atómica justo cuando las primeras presentaciones de la nueva mecánica de matrices estaban apareciendo en Alemania. La pronta publicación del texto de sus conferencias con su resumen de los primeros resultados obtenidos mediante esa nueva teoría debería constituir un gran servicio como ayuda a mantenernos informados de la corriente de pensamiento en un campo en el que hemos estado inclinados a quedarnos retrasados”.

No fue únicamente al MIT a donde Born llevó el nuevo “evangelio” cuántico. El mismo día que pronunció allí su última conferencia tomó un tren que le condujo a la sede de los laboratorios de General Electric en Schenectady, donde, entre otros, trabajaba un amigo suyo y científico distinguido, Irving Langmuir. De

allí viajó a Ithaca (Universidad de Cornell), Buffalo, Chicago, Pasadena (Caltech), Berkeley, Madison, Nueva York, Princeton y Washington D.C. En total estuvo en doce importantes universidades y centros de investigación. El 23 de marzo de 1926 tomó un barco para regresar a Göttingen. Había sido un gran “misionero” de las buenas nuevas cuánticas.

El apetito de los físicos estadounidenses – y de sus instituciones – por los nuevos conocimientos europeos no hizo sino aumentar a partir de entonces. Así, por ejemplo, en 1927 estuvieron en Estados Unidos Erwin Schrödinger, Abram Ioffe, Arthur Milne y William L. Bragg; en 1928, Léon Brillouin, James Franck, Kramers y Weyl; en 1929, Werner Heisenberg, Paul Dirac, Alfred Landé y Friedrich Hund; en 1930, Enrico Fermi, Albert Einstein, Max von Laue, Yakov Frenkel, Otto Stern y Gregor Wentzel. Pero las universidades estadounidenses no sólo querían visitantes, sino también profesores europeos que se afincaran definitivamente en Norteamérica. En la década de los 20, los “ojeadores” universitarios buscaban especialmente físicos, en particular teóricos (al fin y al cabo era el momento de la física teórica). Paul S. Epstein, un estudiante de Arnold Sommerfeld, fue contratado por Caltech en 1922; en 1923 Michigan invitó a Oskar Klein, y cuando éste se marchó, la universidad convenció a Otto Laporte en 1926, y a Samuel Goudsmit y George Uhlenbeck, en 1927, para que se unieran a su departamento de Física. Llewellyn H. Thomas (1929) y Alfred Landé (1931) fueron a Ohio; Karl F. Hertzfeld, a la Universidad Johns Hopkins (1926), y John von Neumann y Eugene Wigner, a Princeton (1930), al principio a tiempo parcial, de manera permanente poco después. Algunos de estos volverán a aparecer en el siguiente capítulo con relación a María Goeppert Mayer.

No fue solo que los europeos viajaran a Estados Unidos. En los años inmediatamente posteriores al desarrollo de la mecánica cuántica estudiaron en Alemania más jóvenes físicos estadounidenses (teóricos sobre todo) que en cualquier época anterior. Al menos veinticinco físicos (incluyendo algún químico-físico) que alcanzarían renombre más tarde (por ejemplo Gregory Breit, Edwin C. Kemble, Robert S. Mulliken, Linus Pauling, John Robert Oppenheimer, Boris Podolsky, Edward U. Condon, Carl Eckart, Howard P. Robertson, Isidor Isaac Rabi, John C. Slater y John H. van Vleck), estudiaron entre 1926 y 1930 en alguna de las universidades centroeuropeas en las que se trabajaba en mecánica cuántica; el mayor número lo hizo en Göttingen, seguido por Zúrich (ETH; donde enseñaron Pauli y durante algún tiempo Debye y Schrödinger), pero también en Berlín, Leipzig (donde se instaló Heisenberg), Múnich (con Sommerfeld). No tan frecuentados fueron Copenhague (Bohr) y Cambridge (Rutherford, Dirac).

La procedencia académica de los científicos estadounidenses que fueron a estudiar mecánica cuántica a Europa era variada, pero destacaba el número de los ligados a Harvard, Caltech, Berkeley y el MIT, estando el origen del resto distribuido por otras universidades (Princeton, Minnesota, Columbia, Michigan,

Chicago, Cornell y Yale). Algunas fundaciones del propio país ayudaron a que estos viajes fuesen posibles: el *Guggenheim Memorial Foundation Fellowship Program*, inaugurado en 1925, financió el 40 por ciento de los viajes, colaborando también de manera importante el International Educational Board de la Rockefeller Foundation y el National Research Council.

En el Viejo Mundo estos jóvenes aprendieron técnicas y vislumbraron problemas del nuevo universo cuántico. Y al regresar a su patria muchos continuaron con este tipo de intereses y tareas. Por ejemplo, al regresar de sus estancias europeas, Slater (que había estado en Leipzig y Zúrich) y Van Vleck (Copenhague, Cambridge y Oxford) enseñaron la mecánica cuántica en la Universidad de Stanford durante los semestres de verano de 1926 y 1927, respectivamente; posteriormente, en 1929, Slater dio clases de mecánica ondulatoria en la Universidad de Kentucky, y Van Vleck continuó propagando las teorías cuánticas durante los años que enseñó en las Universidades de Minnesota y Wisconsin; Breit (Zúrich) hizo lo propio en Johns Hopkins, y Condon (Göttinga, Múnich)) en Columbia. Particularmente interesante, porque trasciende el campo de la física – el ámbito más característico de la física cuántica – mostrando el valor de la mecánica cuántica en otras áreas, como la química, la disciplina, no lo olvidemos, de Joseph Mayer, es el caso de Linus Pauling, el “Einstein de la química”, como se le ha llegado a denominar.

Pauling estudió en el Oregon Agricultural College (actualmente Oregon State University) entre 1917 y 1922, año en el que se trasladó al California Institute of Technology, con el propósito de doctorarse, lo que consiguió en 1925 con una tesis titulada *The Determination with X-rays of the Structure of Crystals*. Por entonces hacía tiempo que se interesaba por la naturaleza del enlace químico. Cómo llegó a este interés es algo que explicó en un manuscrito publicado bastantes años después:

“Durante mis primeros años como científico, comenzando en 1919, tuve un interés especial en el problema de la naturaleza del enlace químico, esto es, en la naturaleza de las fuerzas que mantienen unidos a los átomos en moléculas, cristales y otras sustancias. Una buena parte de mis trabajos durante aquel primer periodo se dirigió a resolver este problema, aplicando métodos tanto experimentales como teóricos. Tan pronto como se descubrió la mecánica cuántica, en 1925, comencé a intentar aplicar esta poderosa teoría al problema.”

Una vez completado su doctorado, Pauling consiguió una beca de la John Simon Guggenheim Memorial Foundation para ampliar estudios en Europa. Su propósito era pasar un año en Múnich junto a Arnold Sommerfeld, y aprovechar también para visitar a Niels Bohr en Copenhague, a Max Born en Göttinga y a los Bragg (padre e hijo) en Manchester. Llegó a Múnich en abril de 1926. Coincidió con que Sommerfeld estaba desarrollando un curso sobre la reciente mecánica ondulatoria de Schrödinger, curso que Pauling siguió. También mientras estaba en Múnich, Gregor Wentzel, que se había doctorado con Sommerfeld y que en aquel

momento era *privatdozent*, estaba utilizando el novedoso concepto de espín y la nueva mecánica cuántica para estudiar átomos complejos. En ese ambiente, Pauling se convenció de que la mecánica cuántica era necesaria para resolver problemas químicos. A Arthur Noyes, profesor de química en el California Institute of Technology, que le había ayudado para conseguir la beca Guggenheim, le escribía el 12 de julio de 1926: “Ahora estoy trabajando en la nueva mecánica cuántica, ya que pienso que la química atómica y molecular lo requerirá. Espero aprender algo sobre la distribución de las órbitas electrónicas en átomos y moléculas”.

Después de pasar un año con Sommerfeld, Pauling estuvo un mes en el Instituto de Niels Bohr en Copenhague, pero allí no fue Bohr quien más le influyó sino el holandés Samuel Goudsmit con quien publicaría en 1930 un influyente libro, *The Structure of Line Spectra* (McGraw-Hill, Nueva York) (por entonces Goudsmit ya profesaba en la Universidad de Michigan). Hasta el otoño de 1928, cuando regresó a América, Pauling pasó el resto del tiempo en Zúrich, donde estaba Schrödinger. Pero no fue con este con quien más se relacionó sino con dos jóvenes ayudantes, Walter Heitler y Fritz London, quienes publicaron a principios de 1927 un artículo en el que explicaban la estabilidad de la molécula de hidrógeno mediante la recientemente formulada mecánica cuántica. Se titulaba “Interacción entre átomos neutros y el enlace homopolar de acuerdo a la mecánica cuántica”. Más concretamente, lo que hicieron fue estudiar la interacción entre dos átomos de hidrógeno, con el resultado de que obtenían el enlace químico como consecuencia de una “resonancia” mecánico-cuántica, un concepto este, el de resonancia, que había sido introducido en la mecánica cuántica el año anterior por Heisenberg, con relación a los estados cuánticos del átomo de helio.

“Inmediatamente”, escribió años más tarde Pauling, “comencé a aplicar la teoría de Heitler y London a sistemas más complicados, y en 1928 publiqué un breve artículo sobre la teoría del par de electrones compartidos en el enlace químico [...]. En 1931, estimulado en parte por el trabajo de John Slater [...] publiqué una descripción detallada de la mecánica cuántica del enlace covalente”.

En 1939 condensó sus trabajos sobre la naturaleza del enlace químico en un gran libro, *The Nature of the Chemical Bond*. En él decía:

“Durante mucho tiempo he estado planeando escribir un libro sobre la estructura de moléculas y cristales y la naturaleza del enlace químico. Con el desarrollo de la mecánica cuántica y su aplicación a problemas químicos se hizo evidente que tendría que tomar una decisión acerca de hasta qué punto se deberían incorporar los métodos matemáticos de la teoría en este libro. Llegué a la conclusión de que, incluso aunque muchos de los recientes progresos de la química estructural se habían debido a la mecánica cuántica, debería ser posible describir los nuevos desarrollos de una forma directa y satisfactoria sin recurrir a matemáticas avanzadas. Solamente una pequeña parte del cuerpo de las contribuciones de la mecánica cuántica a la química ha sido de carácter mecánico-cuántico;

por ejemplo, únicamente en unos pocos casos se han obtenido resultados de interés químico directo mediante la solución exacta de la ecuación de ondas de Schrödinger [...]. La principal contribución de la mecánica cuántica a la química ha sido sugerir nuevas ideas, tales como la resonancia de moléculas entre varias estructuras electrónicas con el consiguiente aumento de estabilidad”.

La química cuántica contó a partir de entonces con un libro canónico de texto, uno de esos que sirven para configurar una disciplina.

La emigración de científicos europeos a Estados Unidos

En los capítulos anteriores hemos ido encontrado algunas de las consecuencias que las políticas raciales, introducidas por el Gobierno nazi presidido por Adolf Hitler, tuvieron para algunos de los científicos que ocupaban puestos en las universidades alemanas, los casos de Born, Franck, Blau o Sponer. Según fue expandiéndose el dominio geográfico alemán, se amplió el ámbito de aplicación de las medidas raciales, incluyendo a partir de marzo de 1938 a Austria con la ya mencionada “Anexión” (*Anschluss*). Por su parte, el fascismo italiano, mimético del nazismo germano y deseoso de atraerse las simpatías alemanas, culminaba la campaña de propaganda antisemita, campaña comenzada por Benito Mussolini en julio de 1938 cuando dio instrucciones a los secretarios de los ministerios de los que él mismo se encargaba (Guerra, Marina y Aviación) de que no se aceptasen judíos en las academias militares. El 14 de julio se publicaba en el *Giornale d'Italia* lo que se conoce como el *Manifesto della Razza*, en el que “un grupo de investigadores fascistas, profesores de universidades italianas” que habían trabajado “con el apoyo del Ministerio para la Cultura Popular”, manifestaba que el “fascismo se enfrenta con los problemas raciales”. El 17 de agosto, una circular del Departamento de Interior ordenaba a los Prefectos que no nombrasen a judíos para puestos oficiales, órdenes que se complementaron entre septiembre y noviembre con otras que profundizaban en la persecución de los judíos, italianos o extranjeros.

La incomparable ciencia matemática italiana se veía especialmente afectada, ya que los afamados Vito Volterra, Tullio Levi-Civita, Federigo Enriques, Guido Castelnuovo, E. E. Levi y C. Segre, eran de origen judío. También perdió Italia a su joya más preciada: Enrico Fermi (1901-1954), cuya esposa era de ascendencia judía y que, como veremos en el siguiente capítulo, se relacionó con María Goeppert Mayer. Fermi aprovechó el viaje que realizó a Estocolmo, a recoger el premio Nobel de Física en diciembre de 1938, para no regresar a su patria y trasladarse a Estados Unidos, adonde llegó con su familia el 2 de enero de 1939.

Otros científicos, por entonces no tan famosos, también abandonaron Italia. Por ejemplo, Salvador Luria, que en 1969 obtuvo el premio Nobel de Fisiología y Medicina por sus trabajos sobre los mecanismos de los virus bacteriófagos y las afecciones virales. En su autobiografía, Luria escribió: “En 1938 me vi desgarrado entre la llamada del deber hacia mis padres, lo que significaba quedarme con ellos



Participantes en el Congreso Solvay de 1930



E.T.S. Walton,
E. Rutherford
y J. Cockcroft

Asistentes al congreso sobre física nuclear celebrado en Roma (octubre 1931). Aparecen, entre otros, Millikan, Compton, Curie, Richardson, Marconi, Bothe, Rossi, Stern, Debye, Bohr, Aston, Ellis, Sommerfeld, Perrin, Corbino, Rasetti, Brillouin, Ehrenfest, Fermi y Mott



y volver a la medicina, y la llamada de la libertad, que me impelía hacia donde yo pudiese ser un hombre de ciencia. Esta última ganó, debo decir que con plena aprobación de mis padres, quienes sintieron que una vez en el extranjero yo mismo estaría más seguro y podría brindarles ayuda. Las noticias de Alemania – como ejemplo notorio la *Kristallnacht*, más avanzado aquel año – me hicieron ver claramente lo improbable de que las persecuciones de los judíos se limitaran, ni aun en Italia, a una humillación no violenta”.

Algunos emigrados notables a Estados Unidos en el campo de las ciencias físico-matemáticas y biológicas

Físicos: Hans A. Bethe (1935), Felix Bloch (1934), Peter Debye (1940), Albert Einstein (1933), Enrico Fermi (1939), James Franck (1933), Philipp Frank (1938), Maurice Goldhaber (1938), Victor F. Hess (1938), Fritz London (1939), Franco Rasetti, Bruno Rossi (1939), Emilio Segré (1938), Otto Stern (1933), Leo Szilard (1938), Edward Teller (1935), Victor Weisskopf (1937).

Astrofísicos: Walter Baade, Rudolph Minkowski (1935), Martin Schwarzschild (1937).

Químicos: Kasimir Fajans (1936), Herman F. Mark (1940), Eugene Rabinowitch (1938; a partir de 1947 se dedicó preferentemente a la botánica y a la biología).

Matemáticos: Emil Artin (1937; regresó a la República Federal Alemana en 1958), Salomon Bochner (1933), Richard Courant (1934), William Feller (1939), Kurt Gödel (1940), Karl Menger (1937), Richard von Mises (1939), Emmy Noether (1933), Alfred Tarski (1939), Stam Ulam (1936), Hermann Weyl (1933).

Ciencias bioquímicas y biomédicas: Konrad Bloch (1935), Ernst Caspari (1938), Erwin Chargaff (1934/35), Max Delbrück (1937), Heinz Fraenkel-Conrat (1936), Kurt Goldstein (1934), Fritz Lipmann (1939), Otto Loewi (1940), Salvador Luria (1938), Otto Meyerhof (1940), David Nachmansohn (1939), Hans Neurath (1935).

La mayoría de estos científicos terminaron haciendo de Estados Unidos su patria. Ejemplo magnífico en este sentido es la carta que uno de ellos, el ilustre físico nuclear alemán Hans Bethe (1906-2005) envió a Arnold Sommerfeld. Bethe emigró a Gran Bretaña en 1933 y después de pasar por las universidades de Manchester y Bristol, se trasladó en 1935 a Estados Unidos, a Cornell, nacionalizándose ciudadano estadounidense en 1941; en 1967 obtuvo el premio Nobel de Física por las contribuciones que realizó, en 1938, a la teoría de las reacciones nucleares, especialmente a la producción de energía en el interior de estrellas. Tras la guerra, Bethe, un antiguo alumno de Sommerfeld, recibió de éste la muy tentadora oferta

de sucederle en su cátedra de la Universidad de Múnich, uno de los grandes puestos académicos de la física germana. He aquí la respuesta de Bethe a Sommerfeld, fechada el 20 de mayo de 1947:

“Me agradó y honró mucho que haya pensado en mí como su sucesor. Si pudiera hacer desaparecer todo lo que ha sucedido desde 1933, estaría muy feliz de aceptar esta oferta. Sería maravilloso regresar al lugar en el que aprendí física de usted, y en donde aprendí a resolver problemas cuidadosamente. Y donde después, como su ayudante y *privatdozent*, tuve lo que probablemente haya sido el periodo más provechoso de mi vida científica. Sería maravilloso intentar continuar su obra y enseñar a alumnos de Múnich de la misma forma en que usted lo ha hecho siempre; con usted, uno estaba seguro de conocer siempre los últimos avances de la física, y al mismo tiempo aprender la precisión matemática que tantos físicos teóricos descuidan hoy.

Desgraciadamente, no es posible borrar los últimos 14 años [...]. Para nosotros, los que fuimos expulsados de nuestros puestos en Alemania, no es posible olvidar. Los estudiantes de 1933 no querían aprender física teórica conmigo (y era un grupo numeroso de estudiantes, acaso incluso la mayoría), y aun si los estudiantes de 1947 piensan de otra manera, no puedo fiarme de ellos. Y lo que oigo acerca de la orientación nacionalista que se está despertando de nuevo en muchas universidades, y también en muchos otros alemanes, no es reconfortante.

Acaso más importante que mis recuerdos negativos de Alemania, sea mi actitud positiva hacia América. Me parece (ya desde hace muchos años) que me encuentro más a gusto, como en mi casa, en América, de lo que me encontraba entonces en Alemania. Como si sólo por equivocación hubiese nacido en Alemania, y únicamente llegase a mi verdadera patria a la edad de 28 años. Los americanos (casi todos ellos) son amigables, no encorrotados y reservados, o incluso bruscos, como la mayoría de los alemanes. Aquí es natural entrar en contacto amigable con todo el mundo. Profesores y estudiantes se comunican entre sí como colegas, sin ningún muro levantado entre ellos artificialmente. El trabajo científico se realiza sobre todo en colaboración, y uno nunca ve competitividad envidiosa entre los científicos. Y políticamente, la mayoría de los profesores y estudiantes son liberales y piensan en el mundo exterior a su país, esto fue para mí una revelación, ya que en Alemania lo normal era ser reaccionario (mucho antes de los nazis) y repetir mecánicamente los *slogans* del Partido Nacional Alemán. En resumen: encuentro mucho más agradable vivir con americanos que con mis contemporáneos alemanes.

Además, América me ha tratado muy bien. Llegué aquí bajo circunstancias que no me permitían ser muy selectivo. En poco tiempo tenía una cátedra, probablemente más rápidamente de lo que hubiera ocurrido en Alemania si Hitler no hubiese aparecido. Se me permitió, siendo un inmigrante bastante reciente, trabajar en laboratorios relacionados con el esfuerzo bélico, y en puestos

prominentes. Ahora, tras la guerra, Cornell ha construido un nuevo y gran laboratorio de física nuclear, esencialmente ‘en torno a mí’. Y 2 o 3 de las mejores universidades americanas me han hecho ofertas tentadoras.

No necesito mencionar el lado materialista, no sólo relativo a mi propio salario, sino también el equipo del instituto. Y espero, querido Sommerfeld, que usted comprenderá; que comprenderá que amo a América y que debo a América mucha gratitud (completamente aparte del hecho de que me gusta estar aquí). Que comprenderá las sombras que se interponen entre mí y Alemania. Y, por encima de todo, que comprenderá que a pesar de mi ‘No’ le estoy muy agradecido por haber pensado en mí”.

Científicas en Estados Unidos

En el dominio de la educación de las mujeres, al igual que en muchos otros aspectos, Estados Unidos se movió dentro de unas coordenadas relativamente diferentes a las de las naciones europeas. Su gran extensión territorial, el elevado número de centros educativos de todo tipo, las costumbres y el estilo de vida explican las diferencias. De hecho, Estados Unidos mantuvo una actitud más abierta de la que tuvo, por ejemplo, Inglaterra, aunque esto no quiere decir que las mujeres encontrasen en Norteamérica menores dificultades que en otros lugares a la hora de intentar desarrollar una carrera científica.

El movimiento en favor de que las mujeres accediesen a la educación superior comenzó a afirmarse en Estados Unidos en la década de 1860, ya que aunque Oberlin College (ubicado en Oberlin, Ohio) había estado abierto a ambos sexos desde su fundación en 1833, el auténtico empuje vino con la apertura en 1865 del Vassar College, en Poughkeepsie (Nueva York). Hacia 1870, muchas de las universidades estatales, especialmente las que se habían creado con los beneficios de la venta de terrenos públicos, aceptaban estudiantes femeninas. Precisamente, en 1870, Myra Bradwell (1831-1894) dirigió una instancia al Tribunal Supremo del Estado de Illinois pidiendo permiso para ejercer la abogacía. El Tribunal puso objeciones, pero en 1873 la legislatura del Estado promulgó una ley que declaraba que “ninguna persona será excluida de una ocupación, profesión o empleo (con la excepción de la militar) por razones de sexo”. Y en 1880 una mujer había sido elegida miembro del Tribunal Supremo de los Estados Unidos. Al principio, las universidades de Cornell y de Michigan fueron las que más hicieron por la educación científica de mujeres, pero esto cambió con el establecimiento de varios *colleges* femeninos (Smith 1871, Wellesley 1875, Bryn Mawr 1885, y Baltimore College for Women 1885), que además de prestar atención a la ciencia daban empleo como profesoras a un buen número de mujeres. No obstante, y limitándome al campo de la ciencia, no se esperaba que las graduadas se convirtiesen en científicas profesionales; si acaso, que participasen en la empresa científica como aficionadas. La

ambivalencia en que se movían incluso las propias mujeres era notoria. Williamina P. Fleming, una “calculadora” (mujer que realizaba – manualmente o con máquinas muy primitivas – cálculos complicados) del Harvard College Observatory, y de la que hablaré más adelante, escribía en 1893: “Aunque no podemos mantener que toda mujer es igual al hombre, en muchas cosas su paciencia, perseverancia y método la hacen superior a él. Por consiguiente, esperemos que en Astronomía, que en la actualidad proporciona un amplio campo para el trabajo y habilidades de la mujer, ésta pueda, como ha ocurrido en otras ciencias, al menos demostrar ser su igual”.

De todas maneras, los vientos corrían favorables a las mujeres. Un ejemplo de que era así se encuentra en la Exposición Universal que se celebró en Chicago en 1893, la gran exposición colombina que pretendía celebrar el descubrimiento del Nuevo Mundo. Todas las grandes Exposiciones Universales celebradas hasta entonces habían sido utilizadas por las naciones anfitrionas para mostrar al mundo lo mejor de sí mismas y Estados Unidos pretendía, naturalmente, hacer lo mismo. Por ello es significativo que la mujer fuese uno de los temas seleccionados para figurar de manera prominente en la Exposición de Chicago. Así, uno de los locales de la exhibición era el “Edificio de las Mujeres”, en el cual se celebraron exposiciones mostrando los logros de éstas en educación, artes, ciencias e industria. Igualmente, se estableció una comisión nacional compuesta por 115 miembros (denominada popularmente *Board of Lady Managers*). “Más importante que el descubrimiento de Colón – señaló ante una audiencia de más de 100.000 personas Bertha Honoré Palmer, presidenta de la Comisión – es el hecho de que el Gobierno acabe de descubrir a la mujer”. Asimismo, tuvo lugar un Congreso Mundial de Mujeres Representativas, que comenzó el 15 de mayo; 330 mujeres hablaron ante una audiencia que sumó, en total, 150.000 personas.

Para conocer qué estudios científicos seguían las primeras universitarias norteamericanas, se pueden utilizar los datos recopilados por Margaret Rossiter, que arrojan luz acerca de los campos a que se dedicaron las científicas estadounidenses hasta 1920. En ese periodo, 414 mujeres se licenciaron en materias científicas en 98 instituciones. Los títulos se repartieron de la siguiente forma: botánica 80, zoología 80, psicología 67, ciencias médicas 45, matemáticas 41, química 35, geología 23, física 23, astronomía 18 y antropología 2. Una proporción apreciable de estas estudiantes (94) procedían de Wellesley, Vassar y Smith College.

Otro indicador en el mismo sentido, pero ahora en el periodo de entre guerras, es el de los doctorados adjudicados a mujeres en las universidades estadounidenses.

Doctorados para mujeres (1920-1938)

CAMPO	TOTAL	M	%
Medicina	1.194	254	21,3
Química	6.052	487	18,4
Física	1.831	186	14,7
Zoología	2.503	395	15,8
Matemáticas	1.954	132	13,8
Botánica	1.098	219	19,9
Psicología	1.559	417	26,7
Antropología	1.197	159	29,9

Uno de los campos de trabajo en Estados Unidos en el que la presencia de mujeres era relativamente numerosa en comparación con el número de hombres es el de la astronomía-astrofísica, aunque como veremos enseguida ocupando puestos secundarios. El final del siglo XIX coincidió con un desplazamiento de los principales observatorios astronómicos del Viejo al Nuevo Continente. La técnica avanzaba lo suficiente como para que fuese cada vez más costoso construir observatorios con pretensiones, y en Estados Unidos resultó posible reunir las sumas de dinero necesarias, bien porque las universidades poseían los medios suficientes o por la existencia de benefactores inclinados en favor de la astronomía, como Percival Lowell, un rico inversor de Boston, que hizo posible la creación, en 1894, del Observatorio Lowell. Además, las condiciones geográficas y meteorológicas reinantes en las naciones europeas más desarrolladas no podían competir fácilmente con la variedad existente en Estados Unidos, como fue el caso, por ejemplo, de los observatorios de Monte Wilson y Monte Palomar en California, provistos de espejos reflectores de 2,5 y 5 metros, respectivamente (en el primero, Edwin Hubble descubrió que el universo se expande).

Al aumentar las dimensiones y complejidad de los observatorios, crecía también la necesidad de ayudantes, de personal especializado en todo tipo de funciones. Una de esas funciones era la de clasificar fotografías, situar objetos estelares en las placas obtenidas o efectuar todo tipo de cálculos mecánicos. Sin las facilidades de que hoy disponemos, esas labores se realizaban manualmente; eran trabajos subalternos. Entre 1875 y 1920, al menos 164 mujeres trabajaron como ayudantes en los principales observatorios astronómicos estadounidenses. (Lo mismo sucedería décadas más tarde, antes de que las técnicas automáticas de análisis de datos entrasen en funcionamiento, en los centros en que se analizaban las fotografías de colisiones de partículas subatómicas obtenidas en los grandes aceleradores de partículas; se empleaban mujeres para medir datos que luego estudiaban los físicos, mayoritariamente varones.)

Veamos, para ilustrar las dificultades que encontraban las mujeres para acceder a una carrera plena de investigación en ciencia, algunos ejemplos pertenecientes al campo de la astronomía-astrofísica.

WILLIAMINA FLEMING

En 1881, Edward Pickering, director del Harvard College Observatory desde 1877, se enfadó tanto con la ineficacia de su ayudante masculino en copiar y calcular que, parece, manifestó que incluso su doncella podría hacerlo mejor. Inmediatamente contrató a Williamina P. Fleming (1857-1911), una emigrante escocesa de 24 años, graduada en una escuela pública, madre separada. Fleming permanecería 30 años en el Observatorio, llegando a ser una astrónoma respetada. De entre sus trabajos destaca el que de las 23 novae identificadas en Occidente entre 1572 y 1899, 7 lo fuesen por Fleming (una de ellas, la descubierta en 1895 – Z Cen, de magnitud 7 – era, de hecho, una supernova). Igualmente, el *Draper Catalogue of Stellar Spectra* de 1890, un instrumento extremadamente útil para los astrofísicos de la época, fue debido en gran parte a los esfuerzos de Fleming. El catálogo clasificaba los espectros, dando también las magnitudes (hasta la octava), de más de 10.000 estrellas.

Entre las obligaciones de Fleming figuraba la de contratar y dirigir un grupo de otras mujeres ayudantes, a las que se pagaba un modesto salario por clasificar fotografías de espectros estelares. Entre 1885 y 1900 tuvo veinte de esas ayudantes, entre las que figuraban graduadas de *colleges* como Vassar, Wellesley o Radcliffe. Henrietta S. Leavitt (graduada por Radcliffe College en 1892), con quien nos volveremos a encontrar enseguida, fue una de ellas.

Es evidente que Fleming estuvo bien considerada por Pickering... pero hasta cierto punto: era, al fin y al cabo, “nada más que una mujer”. Por su parte, Fleming respetaba a su director, pero no tanto como para no indignarse ante un tratamiento que consideraba injusto cuando lo comparaba con el que recibían sus colegas masculinos. Así, el 12 de marzo de 1900, anotaba en su diario (conservado en los archivos de la Universidad de Harvard, de la que dependía el Observatorio):

“Tuve alguna conversación con el director con relación al salario de las mujeres. Parece pensar que ningún trabajo es demasiado o demasiado duro para mí, no importa la responsabilidad o las horas que dure. Pero en cuanto saco a relucir la cuestión del salario se me dice inmediatamente que recibo un salario excelente teniendo en cuenta lo que cobran las mujeres [...]. Algunas veces me siento tentada de abandonar y dejarle que intente con otra persona, o que alguno de los hombres haga mi trabajo, para que así se dé cuenta de lo que está obteniendo por los 1.500 dólares anuales que me paga, comparado con los 2.500 que reciben otros ayudantes. ¿Se para a pensar en algún momento que yo tengo una casa y una familia que mantener lo mismo que los hombres? Pero supongo que una mujer no tiene derecho a tales lujos. ¡Y a ésta se la considera una era ilustrada!”

HENRIETTA LEAVITT

Como he apuntado antes, una de las ayudantes de Fleming fue Henrietta Swan Leavitt (1868-1921). Su caso es también ilustrativo.

Durante la primera década del siglo xx se hizo patente que existía un gran número de estrellas variables (estrellas cuya luminosidad varía con periodicidad) en las Nubes de Magallanes. Leavitt fue una de las mujeres que se encargaron en el Harvard College Observatory de analizar fotografías buscando este tipo de estrellas. Fruto de su trabajo fue un artículo publicado en 1908, en el que analizaba placas fotográficas tomadas en el observatorio que Harvard tenía en Arequipa, Perú (hemisferio sur): *1.777 variables in the Magallanic clouds (Harvard College Observatory Annals 60, n.º 4, pp. 87-108, 1908)*. Lejos de limitarse a encontrar nuevas estrellas variables, Leavitt se dedicó también a determinar los periodos con que variaban sus luminosidades. En este artículo de 1908 dio los periodos de 16 de esas estrellas, apuntando que “merece la pena señalar [...] que las [estrellas] variables más brillantes tienen periodos más largos”. En 1912 había extendido sus cálculos a 25 estrellas, estableciendo que existía una relación aproximadamente lineal entre el logaritmo de su periodo y su luminosidad aparente (la observada en la Tierra). La relación descubierta por Leavitt tenía un gran valor potencial, pues mediante algunas operaciones matemáticas y determinadas observaciones se podía deducir la luminosidad absoluta (la intrínseca) de la estrella, lo que a su vez permitía determinar distancias astronómicas. Parece que Leavitt se dio cuenta de tal utilidad; no obstante, no pudo sacar partido de ella, algo que quedaría reservado para astrónomos como Harlow Shapley o Edwin Hubble, ambos del Observatorio de Monte Wilson. El primero utilizó la relación descubierta por Leavitt para calibrar las magnitudes absolutas de las cefeidas, con lo que daba el paso decisivo para poder emplearlas como indicadores de distancias; de hecho él mismo determinó la distancia a la que se encuentran los cúmulos de estrellas que rodean a la Vía Láctea. Por su parte, utilizando las cefeidas, Hubble demostró en 1924 que nuestra galaxia, la Vía Láctea, no agota el Universo, sino que éste está poblado por galaxias separadas entre sí, con lo que sentenciaba un debate centenario. Algunos años después, en 1929 y utilizando de nuevo cefeidas, demostraba que el Universo se expande.

CECILIA PAYNE-GAPOSCHKIN

En 1923 se inauguró un programa de estudios graduados en astronomía en Harvard, con lo que se suplía una carencia que había constituido una de las principales debilidades del Observatorio desde su creación. Del éxito del programa da idea el que, entre 1930 y 1945, aproximadamente un tercio de los doctorados en astronomía logrados en Estados Unidos procedían de Harvard. Pues bien, la primera persona en obtener un doctorado dentro de aquel programa fue una mujer,

Cecilia Helena Payne-Gaposchkin (1900-1979), una inglesa que con anterioridad había estudiado en el Newnham College de Cambridge.

La tesis de Payne-Gaposchkin se titulaba *Stellar Atmospheres* y fue publicada en 1925 como la *Harvard Observatory Monograph* número 1. Hasta 1925, la creencia general era que el Sol y las estrellas contenían los mismos elementos que la Tierra, aproximadamente en las mismas proporciones. Esta suposición se apoyaba en las observaciones espectroscópicas realizadas y era consistente con la creencia de que nuestro planeta se había formado a partir de materiales extraídos del Sol. A partir de 1920, los físicos M. N. Saha, R. H. Fowler y E. A. Milne utilizaron la física cuántica y la mecánica estadística para estimar la temperatura de las atmósferas estelares a partir de los espectros observados. Cecilia Payne extendió esas teorías y demostró que podían utilizarse para estimar la composición química de la superficie de una estrella. Su resultado más sorprendente fue que las atmósferas estelares están compuestas, fundamentalmente, de hidrógeno y helio.

Tras completar su doctorado, y no pudiendo encontrar ningún trabajo relacionado con la astronomía en Inglaterra, Cecilia Payne permaneció en el Observatorio de Harvard. En 1934 se casó con el astrónomo de origen ruso Sergei Gaposchkin, a quien había conocido durante un viaje a Alemania y al que Cecilia ayudó a encontrar trabajo en Harvard. En 1956, y tras haber tenido tres hijos, Payne-Gaposchkin se convirtió en la primera mujer *full professor* (catedrática) de la historia de la Universidad de Harvard.

Siendo como son, fidedignos, los datos precedentes no dan idea de las dificultades que Cecilia Payne sufrió. Afortunadamente, ella misma nos dejó constancia de las mismas en su autobiografía. La cita es larga, pero merece la pena, pues además de explicar las discriminaciones y dificultades que existían para las mujeres que aspiraban a ser científicas en Inglaterra, algunos de los detalles que daba sobre su carrera en Estados Unidos fueron compartidos por María Goeppert Mayer:

“Una mujer conoce la frustración de pertenecer a un grupo minoritario. Podemos no ser realmente una minoría, pero ciertamente que estamos en inferioridad de condiciones. Tempranas experiencias me habían enseñado que mi hermano era valorado por encima de mí. Su educación dictaba los movimientos de la familia. Debía ir a Oxford a cualquier precio. Si yo quería ir a Cambridge, debía apañármelas por mí misma. Pronto aprendí la lección de que un hombre podía escoger una profesión, mientras que una chica debía ‘aprender a mantenerse por sí sola’. Presumiblemente, esto debía ser así hasta que encontrara un marido. Pero pronto vi que difícilmente yo podría aspirar a hacer eso, ya que no tenía dinero propio. Tal era el código social victoriano en el que crecí.

En mi caso, el obstáculo real para casarme era que no me relacionaba en absoluto con hombres. Existía una ley no escrita en nuestra casa, según la cual si mi hermano traía a casa a algunos de sus amigos, sus hermanas debían aparecer

lo menos posible. Esto era parte del código social de la escuela pública de chicos de la época, otro aspecto de la discriminación entre sexos.

Una o dos veces me invitaron a un baile, ofrecido por algún amigo del colegio como una fiesta de despedida. Esto constituía una intensa agonía. No sabía bailar. Además, mi ropa me avergonzaba, ya que ésta había sido utilizada antes por la hija de un amigo rico, que nos la pasaba cuando ella ya no la quería. Todavía recuerdo el horror que sentí cuando supe que uno de compañeros de baile la conocía, y pensé con gran vergüenza que él reconocería probablemente el vestido que yo llevaba. Incluso cuando conversaba era un desastre. Un amigo de mi hermano, al que había intentado entretener, le dijo después: ‘¡Curioso! Una chica que lee a Platón por placer!’. Sencillamente, no sabía cómo comportarme en un baile.

Las cosas no mejoraron cuando fui a Cambridge. Se segregaba a las mujeres en las clases. Incluso se las emparejaba en el laboratorio, tratándolas (¿lo había imaginado?) como estudiantes de segunda clase. Podría haber sido diferente si yo hubiese sido alegre y atractiva, y hubiese llevado bonitos vestidos. Pero era poco atractiva, cómicamente seria y agonizantemente tímida. El *demonstrator* del Laboratorio de Física Avanzada dijo a alguien (que amablemente me lo repitió) que yo era ‘lenta’. No se me ocurrió protestar. ¡Podía ser ignorante y torpe, pero no *lenta*! Decidí no prestar más atención a lo que pudiese decir Henry Thirkill: simplemente, no se daba cuenta. Desgraciadamente para mí, él era uno de los examinadores finales del [*Mathematical Tripos*] *Tripes* [el examen característico de Cambridge, altamente competitivo que ‘clasificaba’ a los estudiantes], y creo que fue responsable de colocarme en la segunda clase. Supe por rumores que el otro examinador, William Bragg, a quien yo adoraba, había querido situarme en un puesto más alto. Henry Thirkill me había retrasado [...].

La actitud hacia las mujeres que oprimió mi infancia y juventud era típica de la Inglaterra de la época. Cincuenta años no han cambiado mucho la situación. Aunque mi trabajo era bien conocido cuando tenía 30 años, estoy segura de que no habría tenido la menor oportunidad de obtener un puesto en Inglaterra entre el momento que fui a Harvard y aquel en que me jubilé en 1965 [...]. Aunque había ido a la Universidad correcta, había estudiado el tema equivocado. Uno no podía llegar a ser astrónomo en Inglaterra sin haber obtenido un lugar en la Primera Clase en el *Mathematical Tripos*. Y, por supuesto, yo era una mujer. El Observatorio Real era administrado por el Almirantazgo. El temible H. H. Turner manifestó que cuando se le preguntó a un candidato para el puesto de Ayudante Principal en Greenwich que pruebas había tenido que superar, replicó: ‘Entre otras cosas, tuve que subir por una cuerda’. Yo habría fracasado en esa prueba; subir por cuerdas no ha sido nunca mi punto fuerte. La restricción al sexo masculino ya no domina el Observatorio Real, pero algo asfixia todavía a la astronomía en Inglaterra”.



Computadoras en el Observatorio de Harvard. Fleming aparece de pie y Henrietta Leavitt es la tercera por la derecha



Henrietta Leavitt



Williamina Fleming



Cecilia Payne-Gaposchkin

En este punto, Cecilia Payne pasaba a recordar cómo le fue en Estados Unidos:

“Hacemos las cosas mejor en Estados Unidos. Incluso hace 50 años, una mujer podía realizar investigación astronómica y hacerse un nombre con sus publicaciones. Podía tener un puesto – sin un título, y mal pagada, es cierto – y codearse de igual a igual con cualquier astrónomo del mundo. En mis primeros días en Harvard, todo aquel que era alguien (y muchos más, que iban a ser alguien), se relacionaba con los demás, discutía y fraternizaba. Fueron aquellos unos días gloriosos. Llegamos a conocer a Lundmark, Milne y Unsöld, Hund, Carathéodory y [Paul] ten Bruggencate ¡De qué manera discutíamos, vagábamos por las calles y nos sentábamos hablando en los restaurantes hasta que el encargado apagaba, desesperado, las luces! Nos relacionábamos como iguales; nadie me trataba en base a mi sexo o mi juventud. Incluso, nadie pensó jamás en flirtear conmigo. Éramos científicos, éramos *scholars* (ninguna de estas palabras tiene género [sí en castellano]). En aquella atmósfera embriagadora una mujer no degeneraba en el abominable estereotipo de la *femme savante*, esa combinación de consciente erudición y afectada timidez que sugiere: ‘Realmente no es *femenino* saber tanto como sé yo’. Que diferente de la actitud descrita por una de mis amigas inglesas: ‘Con mi educación, no puedo esperar casarme nunca’. Sí, aquí hacemos las cosas mejor [...].

Pasé muchos años en Harvard, investigando y escribiendo en mis principales intereses, con el añadido de editar, que gradualmente tomó más y más de mi tiempo, y que de paso me enseñó mucho sobre la técnica de escribir. No tenía estatus oficial, el mío era tan pequeño como el de los estudiantes que suministraban las ‘horas de chicas’ [*girl-hours*] en las que Shapley contaba sus gastos de investigación. Me pagaban tan poco que me avergonzaba admitirlo a mis conocidos de Inglaterra. Ellos pensaban que estaba forrándome de dinero en una tierra de millonarios. Pero tenía a mi disposición la colección de placas [fotográficas] de Harvard, podía utilizar los telescopios de Harvard (un dudoso favor éste, en el clima de Cambridge) y tenía la biblioteca en mis manos.

Llegó entonces la época en la que Shapley organizó el Departamento de Astronomía, y comenzó a atraer candidatos doctorales. El primero de estos estudiantes fue Frank Hogg, y (con o sin estatus) yo fui quien dirigió su investigación. Comenzaron las clases, de manera informal al principio, después más organizadamente, y por supuesto yo tuve que dar clase. El nuevo Departamento buscó un director, un catedrático. Yo podría haberlo sido; ¿quién conocía mejor todo? Pero fue ‘imposible’: la Universidad nunca lo permitiría. Solo unos pocos años antes, Theodore Lyman había rechazado aceptar a una mujer como candidata al Ph.D. [doctorado], y Shapley había superado de alguna manera la dificultad. Pero esta vez no iba a ser así. No sé lo que intentó, pero me dijo que el presidente Lowell le había dicho que ‘Miss Payne no tendría un puesto en la Universidad mientras él viviese’. Acaso Shapley lo intentó. Pero mi estatus sin

nombre continuó sin nombre. Se trajo a Harry Plaskett de Victoria para dirigir el nuevo Departamento [...].

No sentí envidia de él, aunque los estudiantes que me estaban asignados pronto transfirieron su lealtad a él. Lo siento, pero consideré que eran ellos los que perdían; a mí me dejaron más tiempo libre para investigar [...].

Solamente años después, cuando se llamó a Harry Plaskett a Oxford para que sucediera a H. H. Turner, sentí envidia de él. Por supuesto que yo no tenía derecho a aspirar a la cátedra Saviliana, pero sentí que habría sido un candidato tan cualificado como él. No por primera vez, pensé que había sido pasada por alto solamente por ser mujer.

Cuando Plaskett dejó Harvard se buscó un sucesor. Shapley me dijo en esa ocasión: ‘Lo que necesita este Observatorio es un espectroscopista’. Yo repliqué indignada que *yo* era una espectroscopista, aunque estaba siendo empujada en contra de mis deseos a la fotometría. Mi protesta no sirvió para nada: había que importar un espectroscopista. Se ofreció el puesto a Otto Struve, quien me contó muchos años después porqué lo rechazó. Shapley le dijo que: ‘Miss Payne abandonará la espectroscopía’, asegurándole de esta manera mano libre. Rechazó el puesto en aquellos términos. Tenía un noble y generoso corazón; fue uno de los gigantes de su tiempo. ¡Si solo hubiese tenido la oportunidad de trabajar con él!

Fue entonces cuando se trajo a Harvard a Donald Menzel, después de que se hiciese un nombre en el Observatorio Lick. De nuevo se me preguntó, ‘¿cuánto me molestaría?’ La base para el sistema ‘Divide y gobierna’ se había sentado muchos años antes. No fue hasta muchos años después, una vez que Shapley se hubiese jubilado, que encontré que Menzel y yo podíamos formar una alianza, en lugar de existir en un estado de tregua armada. Esto fue una grave pérdida para mí, y acaso también para la ciencia [...].

Pasaron los años y Lowell ya no era presidente de la Universidad. Con James Conant el estatus de las mujeres en el Observatorio experimentó un cambio, Miss [Annie Jump] Cannon [1863-1941] era tan famosa como cualquier astrónomo en el mundo, y justamente. Durante muchos años había disfrutado del ambiguo título de ‘Conservador de fotografías astronómicas’, que no tenía ningún estatus en la Universidad. Ahora fue nombrada Astrónoma, y yo recibí el mismo título. Fue un paso adelante para mí, ya que ahora tenía un puesto, aunque todavía con un miserable salario. Mis obligaciones, investigación, clases, dirección de estudiantes, eran de hecho los de un catedrático, pero al menos ahora tenía un puesto en la Universidad [...].

Otro lapso de años, otro presidente de la Universidad, y llegó el momento de que Shapley se retirase de director del Observatorio. Tras un angustioso período de indecisión, Donald Menzel le sucedió. Debo a Donald el avance que

finalmente se me concedió. Las finanzas del Observatorio habían constituido un secreto celosamente guardado, y cuando supo el salario que yo había estado recibiendo, me dijo que se vio sorprendido. Enseguida lo subió, y pronto lo dobló. Más aún, triunfó allí donde Shapley había fracasado (aunque nunca sabré cuán duramente lo había intentado realmente): fui nombrada Phillips *professor* y *chairman* [directora] del Departamento de astronomía. Tal fue el generoso tratamiento que recibí del hombre del que había sido separada sistemáticamente durante muchos años. Él no dejó que mi sexo, o mi menos que cooperativa actitud, se interpusiese en mi camino”.

Cecilia Payne-Gaposchkin terminó encontrando un lugar de trabajo permanente en el Harvard Observatory, detrás de ella existía una larga historia que había hecho que las mujeres constituyesen una figura familiar en astrofísica. Aun así, tardó 31 años en obtener una cátedra.

En general, y cuanto menos hasta bien pasada la Segunda Guerra Mundial, los departamentos de ciencias de las universidades estadounidenses fueron reacios a admitir dentro de su personal investigador o docente a mujeres. La idea subyacente era que era preferible un hombre y, naturalmente, casi siempre, en un lugar o en otro, había un hombre disponible.

Y ahora sí, ya podemos pasar a la biografía de María Goeppert Mayer en Estados Unidos.

CAPÍTULO 4

María Goeppert Mayer en Estados Unidos (1930-1945)

Al llegar a Baltimore (Maryland), Joseph Mayer se incorporó como profesor ayudante (*assistant*) al Departamento de Química de la Universidad Johns Hopkins, pero María se encontró con que sus excelentes credenciales y el conocimiento de la mecánica cuántica que atesoraba, superior al de cualquiera de los miembros de la universidad, servían de poco. Las reglas para impedir el nepotismo, unido a los efectos de la depresión que había estallado con el terrible *crack* de 1929, hacían imposible que la esposa de un docente consiguiera un puesto académico medianamente satisfactorio en dicha universidad. Lo único que logró conseguir fueron algunos cientos de dólares al año por ayudar a un miembro del Departamento de Física con su correspondencia en alemán, aunque esto llevaba asociado el no despreciable privilegio de proporcionarle un lugar donde trabajar, y el darle acceso a las facilidades de la universidad y a las actividades del departamento, en el que las investigaciones experimentales primaban sobre las teóricas. La principal excepción en ese departamento era el brillante teórico Karl Herzfeld, experto en termodinámica y teoría cinética de gases, y que por entonces estaba interesado en la química-física (o, si se prefiere, físico-química), el mismo campo de Joseph Mayer. (Recordemos, capítulo 2, que fue el propio Herzfeld quien le transmitió a Mayer la oferta de trabajo en Johns Hopkins.)

Afortunadamente, la “larga mano” de Göttingen llegaba también a Johns Hopkins. Según Frank Rice, un miembro del Departamento de Química, Max Born había pedido a Herzfeld: “¿Cuidarás de ella?”. Y aún fue más importante que el miembro más notable del Departamento de Física, Robert W. Wood, gran experto en óptica, a quien María consideraba “el físico experimental más importante del mundo, el rey de Baltimore, a semejanza de Hilbert en Göttingen”, que era un viejo

María se encontró con que sus excelentes credenciales y el conocimiento de la mecánica cuántica que atesoraba, superior al de cualquiera de los miembros de la universidad, servían de poco. Las reglas para impedir el nepotismo, unido a los efectos de la depresión que había estallado con el terrible *crack* de 1929, hacían imposible que la esposa de un docente consiguiera un puesto académico medianamente satisfactorio en dicha universidad.

amigo de James Franck, la recibiese bien desde el principio: “Conmigo – manifestó en cierta ocasión María – él fue increíblemente amable y civilizado. Incluso se quitaba la pipa de la boca”.

La oportunidad que le brindaba colaborar con Herzfeld, en un campo que además era el de su marido, llevó lentamente a María Goeppert Mayer al campo de la químico-física, aunque, como veremos, no haría de esta especialidad su hogar científico permanente, aun cuando los conocimientos que obtuvo en esa disciplina le serían posteriormente de mucha utilidad. Que fuese así, que produjese trabajos en campos diferentes, se debió sobre todo a la precariedad en que se desarrolló una buena parte de su carrera científica, teniendo que aprovechar las oportunidades que le ofrecía colaborar con científicos bien establecidos en los centros a los que le llevó la carrera de su marido. Como iremos viendo, en más de un sentido las investigaciones de María Goeppert Mayer fueron orientándose según “soplaban los vientos”, en función de los científicos que le brindaban oportunidades para ello. Si sirve la metáfora, durante un largo periodo de tiempo María Goeppert Mayer fue como un frágil barco de vela que, a pesar de estar bien construido, depende de los vientos y corrientes con que se encuentra. Existe, no obstante, un nexo de unión, un “esqueleto” común en los artículos que fue publicando a lo largo de su carrera: la teoría de la mecánica cuántica en la que se había formado en Göttingen. Afortunadamente, esa teoría tenía – y tiene – un extraordinario rango de aplicabilidad, que terminaría conduciendo a un campo, el de la física nuclear, en el que María logró su mayor éxito científico.

Karl Herzfeld

Karl Herzfeld (1892-1978) había nacido en Viena y estudiado física y química (1910-1912) en la universidad de esta ciudad, pasando a continuación a la ETH de Zúrich donde se relacionó con Otto Stern (Premio Nobel de Física en 1943) quien

le introdujo en el estudio de la termodinámica. En 1913 dejó Zúrich por Göttingen, regresando después a Viena donde obtuvo su doctorado en 1914. Voluntario para servir en el ejército austrohúngaro durante la Primera Guerra Mundial (período durante el que publicó seis artículos sobre física estadística aplicada a problemas de física y de química), al término de ésta regresó a la Universidad de Viena, pero la situación económica en que se encontraba ésta le llevó a Múnich con la idea de estudiar química analítica y obtener un trabajo en la industria química. En Múnich fue ayudante en el laboratorio de químico-física de Kasimir Fajans, que había trabajado con Rutherford en Manchester. Fue entonces cuando le ganó la física teórica y se vinculó al grupo de Arnold Sommerfeld, obteniendo su habilitación en física teórica y químico-física. En Múnich, donde fue durante casi dos años (1925-1926) profesor extraordinario, dirigió la tesis de Walter Heitler, quien se convertiría en un destacado investigador en el campo de la electrodinámica cuántica y la teoría cuántica de campos, contribuyendo a esta última con un influyente libro, *The Quantum Theory of Radiation* (1936); también se relacionó allí con Linus Pauling, quien, como se vio en el capítulo 3, pasó la mayor parte de su estancia posdoctoral europea en Múnich. Durante su estancia en la capital bávara Herzfeld publicó un trabajo – en el volumen 9 de la serie *Handbuch der Physik*, de la editorial Springer-Verlag – sobre la teoría cinética y la física estadística que fue utilizado como texto para graduados en las universidades de habla alemana: *Klassische Thermodynamik* (1926). Fue aquel mismo año de 1926 cuando se trasladó a la Universidad Johns Hopkins con un nombramiento de profesor visitante, que terminó haciéndose estable.

La químico-física, la síntesis del amoníaco y la química cuántica

La químico-física era una disciplina relativamente joven. Sus fundadores, a finales del siglo XIX, fueron Wilhelm Ostwald (1853-1932), Svante Arrhenius (1859-1927) y Jacobus Henricus van't Hoff (1852-1911). En los años previos a la Primera Guerra Mundial la químico-física había recibido un gran impulso gracias a la síntesis del amoníaco, NH_3 . Tal impulso derivaba del hecho de que los vegetales necesitan grandes cantidades de nitrógeno, que es su principal materia nutritiva. El aire contiene cantidades de nitrógeno (N_2) en principio ilimitadas, pero este no puede ser directamente aprovechado por las plantas, obteniéndolo solamente aquellos vegetales que conviven simbióticamente con ciertas bacterias capaces de convertir el nitrógeno atmosférico en amoníaco. Por consiguiente, se necesita recurrir a abonos nitrogenados, más aún cuando se busca aumentar el número de cosechas anuales.

Pero la disponibilidad de abonos constituía un problema, especialmente a partir de la segunda mitad del siglo XIX. En 1913, Alemania – cuya población había crecido de 25 millones en 1800 a 55 en 1900 – consumía 200.000 toneladas de nitrógeno al año, de las que 110.000 eran importadas en forma de nitrato

procedente de Chile, sobre todo, aunque también de Perú y Bolivia (la mayor parte de esa cantidad se empleaba en la agricultura para cosechas intensivas).

Producir amoníaco y compuestos amoniacados a partir del nitrógeno e hidrógeno atmosféricos fue uno de los problemas que los químicos germanos consideraron con vigor desde comienzos del siglo xx. Un problema que necesitaba de las técnicas propias de la químico-física. Hacia 1900 Wilhelm Ostwald estuvo muy cerca de resolver el problema, pero fue Fritz Haber – con el que ya nos encontramos en el capítulo 2 – quien logró lo que Ostwald creyó haber conseguido. Para ello se benefició de los trabajos de otros científicos germanos, como los que realizó sobre los principios termodinámicos otro de los grandes químico-físicos, Walther Nernst, que había sido discípulo de Ostwald en Leipzig. Especialmente importante para Haber, fue el teorema, o tercera ley de la termodinámica, que Nernst presentó en 1905 y que suministraba los medios para calcular los valores de calores específicos.

La culminación de los trabajos de Haber, entonces profesor de Electroquímica en Karlsruhe, se produjo en 1908, ayudado por Robert le Rossignol, un inglés que había trabajado con William Ramsey en el estudio del amoníaco antes de instalarse en Karlsruhe. Fue entonces cuando logró sintetizar amoníaco utilizando osmio y uranio como catalizadores, y empleando presiones muy altas y temperaturas moderadas.

La disponibilidad de un proceso de síntesis del amoníaco al comienzo de la guerra de 1914-1918 constituyó una afortunada coincidencia para Alemania, que pudo de esta manera obtener los abonos artificiales para mantener, e incluso aumentar, su agricultura, ya que no le era posible acceder a los tradicionales abonos naturales debido al bloqueo a que estaba sometida.

El siguiente paso en la consolidación de la químico-física como una parte importante de la química fue la introducción en esta de los conceptos mecanocuánticos. A pesar de lo familiar que nos resultan en la actualidad los vínculos entre la química y la física, esa relación tardó en llegar. El electrón, identificado en 1897 por Joseph John Thomson, director del Laboratorio Cavendish de Cambridge, en experimentos realizados con rayos catódicos, pronto se convirtió en un elemento común a la física y la química. No sorprendentemente, el propio Thomson fue uno de los primeros en introducirlo en la química con su modelo del átomo como un pastel de pasas, en el que situaba a los electrones (las “pasas” del pastel) inmersos en una distribución continua de masa cargada positivamente. En particular, intentó explicar la organización de la tabla periódica de los elementos en función del número de electrones que, según él, existían en círculos concéntricos dentro de su modelo atómico. Es oportuno citar unos pasajes del “Prefacio” que abría uno de los libros de Thomson titulado *The Electron in Chemistry* (1923), resultado de cinco conferencias que pronunció en el Franklin Institute de Filadelfia:

“Ha sido costumbre dividir el estudio de las propiedades de la materia en dos ciencias: física y química. En el pasado esta distinción era real debido a nuestra ignorancia de las estructuras del átomo y la molécula. La región dentro del átomo o de la molécula era un territorio desconocido para la vieja física, que no disponía de ninguna explicación que ofrecer acerca de por qué las propiedades de un elemento diferían de las de otro elemento. Como la química se ocupaba sobre todo de esas diferencias, existía una distinción muy real entre las dos ciencias.

Sin embargo, en el curso del último cuarto de siglo los físicos han penetrado en ese territorio y han llegado a ideas sobre el átomo y la molécula que indican la manera en que un tipo de átomo difiere de otro y cómo un átomo se une a otros para formar moléculas. Estos son exactamente los problemas de los que se ocupan los químicos, por lo que, si el moderno concepto de átomo es correcto, la barrera que separaba la física de la química habrá sido eliminada”.

Niels Bohr dio otro paso importante en la asociación entre física y química cuando, a partir de 1920, se dedicó a explicar la tabla periódica de los elementos utilizando su modelo cuántico del átomo (se sirvió de una serie de números cuánticos que caracterizan las diferentes capas electrónicas). El desarrollo de la física cuántica se entrelazaba de esta manera con un apartado fundamental de la química, el de la ordenación de los elementos.

El paso fundamental en el camino hacia una comprensión del *enlace químico*, un elemento fundamental en toda teoría química, tuvo como protagonistas a Gilbert Newton Lewis – el director de tesis, recordemos, de Joseph Mayer en Berkeley – y al alemán Walther Kossel, que en 1916 publicaron dos artículos (el de Lewis en el *Journal of the American Chemical Society*, y el de Kossel en el *Annalen der Physik*) que tuvieron un gran impacto en la comunidad química. Lo que Lewis y Kossel sostenían en su teoría – basada en el electrón – es que el enlace químico se puede producir de dos maneras: bien mediante la transferencia de electrones entre átomos (electrovalencia) o compartiendo electrones los átomos (covalencia), aunque también se podrían dar casos intermedios. Como se terminó comprobando, la electrovalencia predomina en la química inorgánica, mientras que la covalencia lo hace en la química orgánica. Fueron las ideas de Lewis las que más influencia ejercieron, especialmente después de que publicase un libro que se convertiría en un clásico: *Valence and the Structure of Atoms and Molecules* (1923). Aunque ya antes un compatriota de Lewis, Irving Langmuir, que trabajaba en laboratorios industriales y que había estudiado en Alemania con Walther Nernst, realizó notables aportaciones en la “reelaboración”, o popularización, del nuevo tipo de enlace. De hecho, fue Langmuir quien introdujo, en un artículo (“La disposición de los electrones en átomos y moléculas”) publicado en 1919 en el *Journal of the American Chemical Society*, los nombres “covalente” y “electrocovalente”. En la sección titulada “Valencia, número de coordinación y covalencia” escribía: “Para distinguir entre la valencia que hemos encontrado así y la que

se da en la teoría de la valencia ordinaria, denotaremos con el término ‘covalencia’ el número de pares de electrones que un átomo comparte con su vecino”.

Langmuir es interesante no sólo por sus contribuciones, que fueron numerosas e importantes (recibió el Premio Nobel de Química en 1932), sino porque es un ejemplo de científico al que el desarrollo de la física cuántica le llegó a una edad lo suficientemente joven como para que se sumase a ese nuevo mundo científico. Advirtió con claridad lo que la física cuántica podía significar para la química. Ejemplo en este sentido es lo que escribió en un artículo publicado en 1921, titulado “Futuros desarrollos de la química teórica”. En él, después de tratar del átomo de Rutherford y Bohr, y de mencionar las aportaciones de William H. y William L. Bragg, Van den Broek y Moseley, señalaba:

“Y todas estas cosas marcan el comienzo, creo, de una nueva química, una química deductiva, una en la que podemos obtener relaciones sin recurrir a intuiciones. La ciencia química del pasado ha sido en cierto modo parecida a la biología, botánica, geología y disciplinas parecidas, en las que no podemos expresar los resultados cuantitativamente. Disponíamos, por supuesto, de algunas leyes cuantitativas; leyes, por ejemplo, termodinámicas, o leyes de combinaciones de proporciones múltiples. Pero aunque estas leyes han tenido una gran importancia, han sido capaces de explicar solamente una proporción insignificante de los fenómenos químicos.

Si miramos hacia el futuro, ¿cuáles serán los desarrollos más probables en la química puramente teórica durante los próximos años? Creo que en el campo de la estructura atómica dominará la química teórica, porque un conocimiento de la estructura atómica nos permitirá deducir las propiedades químicas y físicas de átomos y moléculas”.

Muy pronto esa química teórica iba a contar con un instrumento más poderoso, con la mecánica cuántica. En principio, parecía que bastaría con resolver la ecuación de Schrödinger para el sistema formado por los átomos que componían una molécula para esclarecer así todos los problemas asociados a ésta, incluyendo, claro está, la cuestión del enlace. Paul Dirac, uno de los creadores de la mecánica cuántica, expresó semejante convicción en 1929 en los siguientes términos: “La teoría general de la mecánica cuántica está ahora casi completa, las imperfecciones que todavía existen tienen que ver con el encaje exacto de la teoría con las ideas relativistas [...]. Por consiguiente, las leyes físicas subyacentes en la teoría matemática de una gran parte de la física y de toda la química se conocen completamente, y la dificultad únicamente se encuentra en que la aplicación exacta de estas leyes conduce a ecuaciones demasiado complicadas para ser resueltas.”

El origen de la especialidad que vendría en denominarse *química cuántica*, se asocia generalmente a la publicación, en 1927, de un artículo de Walter Heitler y Fritz London en el que explicaron la estabilidad de la molécula de hidrógeno dentro de la recientemente formulada teoría cuántica. Se titulaba “Interacción

entre átomos neutros y el enlace homopolar de acuerdo a la mecánica cuántica”. Más concretamente, lo que hicieron fue estudiar la interacción entre dos átomos de hidrógeno, obteniendo el enlace químico como resultado de una “resonancia” mecánico-cuántica, un concepto este, el de resonancia, que había sido introducido en la mecánica cuántica el año anterior por Heisenberg, con relación a los estados cuánticos del átomo de helio.

Y en este punto aparece Linus Pauling, con quien la química cuántica encontró, como expliqué en el capítulo 3, uno de sus principales protagonistas. Según uno de sus comentaristas (Bukingham), para él la química era “un fenómeno cuántico, o, mejor, una gran colección de fenómenos cuánticos”. Sin embargo, no hay que olvidar las aportaciones que otros científicos hicieron a este campo. El físico John Slater fue, junto a Pauling, el más destacado de ellos.

Las iniciativas y liderazgo de Pauling y Slater ayudaron a que la química cuántica floreciese en Norteamérica más que en otros lugares. La formulación de la mecánica cuántica coincidió con un momento en el que las ciencias físico-químicas estaban alcanzando en Estados Unidos su mayoría de edad. Y las nuevas ideas atrajeron, especialmente al principio, a jóvenes físicos como John van Vleck, Edward Condon, David Dennison, Ralph Kronig, Isidor I. Rabi, Philip M. Morse, Oscar Rice o George E. Kimball, que en un momento u otro, realizaron aportaciones a la química cuántica.

A este grupo se uniría durante algún tiempo María Goeppert Mayer.

Los años en Johns Hopkins

Que María Goeppert Mayer dejase los temas que había cultivado en Gotinga, al menos parcialmente y durante algún tiempo, por la químico-física fue en realidad prácticamente inevitable: su marido era químico-físico y la física teórica que se hacía en Johns Hopkins estaba en manos de Herzfeld, quien como vimos estaba entonces interesado en la químico-física. Además, los conocimientos de ella servían bien a los fines científicos tanto de su marido como de Herzfeld puesto que esta rama de la química también podía beneficiarse de la nueva física cuántica, que María conocía mucho mejor que los dos; de hecho, fue ella la que enseñó mecánica cuántica a su esposo. Fruto de esas colaboraciones fueron los siguientes artículos, publicados en colaboración con Herzfeld: “Energieübertragung an adsorbierte Moleküle”, *Zeitschrift für Physikalische Chemie* (1931), “The polarizability of ions from spectra”, *Physical Review* (1933), “On the states of aggregation”, *Journal of Chemical Physics* (1934), “On the theory of fusion”, *Physical Review* (1934), “Behavior of hydrogen dissolved in palladium”, *Zeitschrift für Physikalische Chemie, B* (1934) y “On the theory of dispersion”, *Physical Review* (1936). Con Joseph Mayer y Stephen Brunauer, escribió “The entropy of polyatomic molecules and the symmetry number”, *Journal of the American Chemical Society*

(1933). También publicó trabajos con otros científicos: con Albert May, “Some lattice sums involved in the calculation of elastic constants”, *Physical Review* (1936), un trabajo que pertenecía a lo que pronto se denominaría física del estado sólido (más tarde de materia condensada); con Alfred Sklar, un estudiante de Herzfeld, “Calculations of the lower excited levels of benzene”, *Journal of Chemical Physics* (1938), uno de los primeros cálculos – utilizando los métodos de la teoría de grupos, la mecánica cuántica en la versión de matrices y la aproximación de Hund-Mulliken para calcular los niveles moleculares del benceno – realizados entonces de la complicada estructura electrónica del benceno. La colaboración con Sklar surgió del hecho de que Herzfeld estaba interesado en el problema de cómo la estructura química determina las propiedades ópticas – el color, por ejemplo – de una sustancia, y propuso este tema a Sklar para su tesis doctoral. El problema requería utilizar complejas técnicas matemáticas asociadas a los métodos más satisfactorios existentes entonces para determinar los espectros moleculares y Herzfeld sugirió a Sklar que le ayudase María. Sklar, que completó su tesis en 1937, utilizó no el método aproximado de Hund-Mulliken sino el de Heitler-London.

Durante los tres primeros meses de su estancia en Baltimore, los Mayer vivieron en una residencia. Tenían intención de comprar una vivienda pero como iban a pasar el verano participando en la escuela de verano de física que organizaba la Universidad de Michigan en Ann Arbor, prefirieron esperar. Sí se compraron un coche – la gran, con frecuencia imprescindible dadas las distancias existentes, “comodidad” americana – un *Buick*. Con él viajaron a Ann Arbor.

La Escuela de Verano de Ann Arbor llevaba celebrándose desde mediados de la década de 1920, y continuó existiendo hasta el inicio de la Segunda Guerra Mundial. Duraba ocho semanas y en ella participaron, bien como conferenciantes o como asistentes, una parte importante de los principales físicos de aquel período, de entre estos, la mayoría trabajaban en Estados Unidos, pero también participaron algunos extranjeros. Cada año asistían en torno a 50 científicos, un número que permitía los contactos informales. La duración, informalidad y reducido número de participantes, distinguían esta Escuela de los congresos científicos, que ocupaban pocos días y a los que solía asistir un número elevado de científicos. Los renombrados Consejos Solvay de Física, que se celebraban en Bruselas y que comenzaron en 1911, eran asimismo muy diferentes, al estar limitados a una élite de físicos, en general ya de cierta edad.

El holandés George Uhlenbeck, discípulo de Ehrenfest en Leiden, que junto a Samuel Goudsmit introdujo el concepto cuántico de espín en 1925, y que, como éste, era profesor ayudante en la Universidad de Michigan (permaneció allí hasta 1935 cuando sucedió a H. A. Kramers como catedrático en la Universidad de Utrecht, aunque regresaría a América en 1938, y a Ann Arbor en 1939), manifestó que la Escuela de Verano de Ann Arbor “influyó poderosamente en el desarrollo de la física, y ¡desde luego en mí! A menudo, durante el otoño, continuaba tratando



La universidad Johns Hopkins, en Baltimore



Robert Atkinson, Enrico Fermi y María Goeppert Mayer en la escuela de verano de Ann Arbor, 1930



Joseph Mayer, María Goeppert Mayer y Karl Herzfeld en Johns Hopkins

María Goeppert Mayer, Joseph Mayer, Robert Atkinson, Paul Ehrenfest y Lars Onsager en la escuela de verano de Ann Arbor, 1930



de digerir lo que había aprendido en el verano”. En particular señalaba que, el que se involucrase en la teoría de la desintegración beta se debió a esa Escuela.

En la celebrada en el verano de 1930 los conferenciantes principales fueron Enrico Fermi y Paul Ehrenfest. Fermi dio un curso sobre la teoría cuántica de la radiación, en el que introdujo la teoría cuántica de campos, que para algunos de los participantes constituía una novedad. De nuevo según Uhlenbeck, “aquellas conferencias fueron la mejor introducción a la electrodinámica cuántica de que se disponía entonces”. (En la sesión de 1931, los conferenciantes principales fueron Hendrik A. Kramers y Wolfgang Pauli, con intervenciones más breves de Arnold Sommerfeld y Robert Oppenheimer.)

En las pequeñas memorias que Joseph Mayer publicó en el *Annual Review of Chemical Physics* (1982) recordó la experiencia en Ann Arbor:

“En particular, aquella sesión de verano en Ann Arbor [1930] fue enormemente exitosa. Tanto Enrico Fermi como Paul Ehrenfest eran conferenciantes extraordinariamente buenos. Cada uno se sentaba en la primera fila cuando el otro daba su clase y se corregían el inglés el uno al otro, lo que divertía a la audiencia. Pero ambos eran extremadamente claros. La audiencia incluía a Robert Atkinson, un físico y astrónomo inglés, Lars Onsager, Serge Korff, Donald Andrews, Charles Squire y por supuesto Sam Goudsmit y George Uhlenbeck, entonces ambos profesores en Ann Arbor. Nos hicimos particularmente buenos amigos de los Fermi. Laura Fermi siempre era un encanto y Enrico interesante e informativo.”

Acostumbrada a reunirse con prometedores jóvenes físicos en Gotinga, el ambiente de la Escuela de Ann Arbor debió de resultar familiar a María Goeppert Mayer; más aún, el hecho de ser una reunión institucionalizada en la que convivían científicos ya bien establecidos con otros jóvenes – como ella – que aún tenían que demostrar su valía, hacía que la experiencia superase en mucho a lo que había vivido en Gotinga. Especialmente importante fue que conoció entonces a Fermi, y a su mujer, Laura, con la que congenió. Más adelante veremos la importancia que tuvo Fermi para María, cuando coincidieron en la Universidad de Chicago.

Cuando finalizó la escuela, Joseph quiso enseñar a María algunas regiones de Estados Unidos. De nuevo según las memorias de Mayer:

“El viaje incluyó Black Hills, Tetons, Yellowstone y Glacier Parks, y a continuación nos dirigimos al oeste hacia Seattle, deteniéndonos en el Monte Rainier, que subimos. En Seattle, visitamos a Henry Frank [...]. Conduciendo por la base del Monte Rainier, en la medida en que podía nuestro coche, pasamos por el Glaciar Nisqually, que entonces casi llegaba a la carretera [...]. Desde Seattle conducimos hacia el sur, deteniéndonos en el Cráter Lake, y entonces nos dirigimos [...] a la Bahía de San Francisco y Berkeley. En Berkeley visitamos a viejos amigos míos, incluyendo a Robert Oppenheimer y su esposa Kitty.

En los últimos años que estuve en Berkeley, Oppenheimer había regresado de Alemania y dio una conferencia sobre la mecánica cuántica. Creo que no entendí nada pero me impresionó mucho [...]. Hace poco me divertí mucho leer un artículo de Carl Anderson en la revista de Cal Tech, que él había asistido el mismo año a las clases de Oppenheimer sobre mecánica cuántica en Cal Tech. Según Anderson, el número de alumnos de la clase iba disminuyendo y disminuyendo hasta que sólo quedó él. Entonces Oppenheimer se dirigió a él y le dijo: ‘Por favor, no se marche, no puedo continuar sin nadie en la clase. Permítame tener al menos un estudiante hasta el final del cuatrimestre’. En Berkeley fuimos varios los que permanecemos todo el semestre, o lo que fuera el tiempo que Oppenheimer debía dar clase, y lo disfrutamos, pero creo que nos dejó bastante fríos. Oppenheimer no era entonces un buen conferenciante. Su gran facilidad para expresar con claridad lo que quería enseñar solamente la adquirió después [...]. De Berkeley fuimos siguiendo la costa hacia el sur, a Pasadena, donde visitamos a los Paulings. Acampamos en la parcela de Pauling. Tenían una casa muy cerca de Cal Tech [...]. Lo más excitante que nos sucedió en el viaje de vuelta de Pasadena a Baltimore fue una serie de pinchazos que agotaron el dinero que llevábamos. En aquella época era prácticamente imposible hacer efectivo cheques, aunque creo que teníamos algún dinero en el banco en Baltimore”.

Cuando ya tuvieron una casa propia, Joseph y María organizaban con frecuencia reuniones, en las que no faltaban las bebidas, incluso antes de que, en 1933, se aboliese la célebre Prohibición, aprobada por el Congreso en 1917 y ratificada por tres cuartos de los Estados en 1919. Los Mayer gustaban de la bebida y eran muy fumadores.

En la primavera de 1933 nació el primer vástago del matrimonio, Marianne. Poco antes María había adoptado la ciudadanía estadounidense. Después del nacimiento de Marianne dedicó toda su atención al cuidado de la niña dejando de lado durante un tiempo sus investigaciones, una situación que no le resultaba atractiva. De hecho, al cabo de un año volvió a la investigación, tarea que ya nunca abandonó y que, a la postre, significó que la relación que mantuvo con su hija fuera difícil. Pero su situación en la universidad continuaba siendo más que precaria; simplemente, era tolerada, aunque pudo encargarse de alrededor de media docena de cursos (sobre física estadística y mecánica clásica) para estudiantes graduados en el Departamento de Física. Irritado por la situación en que se encontraba María (que en todos los años que permaneció en Johns Hopkins nunca recibió más de 200 dólares anuales, Karl Herzfeld envió la siguiente carta al presidente de la universidad, Joseph Ames:

“Permítame aprovechar esta ocasión para manifestar que en mi opinión [María Mayer] realiza al menos un tercio del trabajo de un asociado a tiempo completo, tanto como profesora como en investigación. Enseña habitualmente

dos horas y media un curso avanzado de física teórica y además participa activamente, de la misma forma que Dieke y yo, en dos seminarios a lo largo de todo el año.

Junto a esto, imparte, junto con su marido y el Dr. Andrews, un seminario de dos horas de química durante todo el año. En lo que se refiere a su investigación, publica varios artículos cada año, normalmente junto con [Joseph] Mayer y conmigo [...]. En resumen, creo que es un miembro muy valioso del departamento, tanto como profesora y como por las publicaciones que produce el departamento. Por la estimación anterior, la remuneración adecuada que debería recibir es de 1.000 \$”.

Esta carta no sirvió para que se le aumentase el sueldo, sino para que se lo redujeran. De hecho, en alguna ocasión renunció a cheques mensuales que recibía; como escribió a su madre: “La universidad tiene tan poco dinero que siempre temo que desaparecerá en bancarrota”.

Una buena nueva fue que James Franck, que había estado en Copenhague junto a Bohr desde que abandonó Göttingen, decidió aceptar la invitación que, con la ayuda económica de la Fundación Rockefeller, le ofreció la Universidad Johns Hopkins, a la que se incorporó en 1935. Aunque mermado, el “círculo de Göttingen” cobraba vida en Baltimore. Allí Franck encontró a su viejo amigo, el ya mencionado Robert Wood, con el que colaboró, y en 1936 publicaron un artículo conjunto en el *Journal of Chemical Physics*, “Fluorescence of chlorophyll in its relation”. También interaccionó con Herzfeld; ambos publicaron – también en *Journal of Chemical Physics* – un trabajo titulado “An attempted theory of photosynthesis” (1936). En este artículo mencionaban que habían consultado con Edward Teller, otro inmigrante ilustre, al que enseguida me referiré. Franck permaneció en Johns Hopkins hasta 1938, cuando aceptó una oferta – mucho mejor desde el punto de vista económico y científico que las condiciones que tenía en Baltimore – de la Universidad de Chicago. Allí se jubilaría.

Cuando en 1937 María volvió a quedarse embarazada, decidió no continuar dando clases (parece que no le gustaba la idea de la imagen que daría ante los alumnos). En su lugar, ella y Joseph decidieron escribir un libro de texto dedicado a la mecánica estadística. Pensaban que lo terminarían en dos años, pero la realidad fue diferente ya que se publicó en 1940: Joseph Edward Mayer y María Goeppert Mayer, *Statistical Mechanics* (John Wiley & Sons, Nueva York; Chapman and Hall, Londres).

Pese a todas las limitaciones que encontró en Johns Hopkins, con la calidad de las investigaciones que completó, algunos estudiantes entendieron su capacidad. Su primer doctorando fue Robert G. Sachs (1916-1999) quien posteriormente desarrollaría una brillante carrera (en 1968 se convirtió en catedrático en la Universidad de Chicago y director del Instituto Enrico Fermi, puesto que mantuvo hasta su fallecimiento en 1999, aunque ya como emérito; entre 1973 y 1979

dirigió el Argonne National Laboratory). Sachs defendió su tesis, titulada *Nuclear spins and magnetic moments by the alpha-particle model*, en 1940 en Johns Hopkins, a pesar de que María estaba por entonces, como veremos, en Nueva York. En realidad, Goeppert Mayer compartió la dirección de la tesis de Sachs con otro físico ilustre y que, como ya dije, desempeñó un papel importante en la carrera de la propia María: Edward Teller.

En el obituario de María Goeppert Mayer que Sachs publicó en las *Biographical Memoirs of the National Academy of Sciences*, recordó aquella primera relación con ella:

“Cuando como su primer *bona fide* estudiante me dirigí a ella para que me guiase a encontrar un problema de investigación, la física nuclear estaba prosperando; y me dijo que era el único campo que merecía que un teórico que comenzaba su carrera considerase. Me llevó a ver a Teller para obtener su consejo sobre posibles problemas de investigación. El trabajo conjunto resultante fue su primera publicación en el campo de la física nuclear. El problema de mi tesis, sobre momentos magnéticos nucleares, también fue seleccionado con la ayuda de Teller, y ella me proporcionó su guía a lo largo de todo aquel trabajo, sugiriendo aplicaciones de técnicas de la mecánica cuántica, que ella tan bien conocía, a este problema de física nuclear”.

El artículo al que se refería Sachs y que publicó junto a Goeppert Mayer se titulaba “Calculations on a new neutron-proton interaction potential”, y apareció en 1938 en *Physical Review*.

Edward Teller

Perteneciente a una generación extraordinaria de científicos nacidos en Hungría – como los matemáticos John von Neumann y George Pólya, los químico-físicos Georg von Hevesy y Michael Polanyi, los físicos Eugene Wigner y Leo Szilard y el, algo mayor, ingeniero aeronáutico Theodore von Kármán –, Edward Teller (1908-2003) fue un gran físico, cuya fama se ha visto marcada por sus radicales ideas políticas en defensa del incremento del arsenal atómico de Estados Unidos, país del que hizo su patria, es conocido especialmente como “el padre de la bomba de hidrógeno”. En 1935 Teller, que llevaba un tiempo en Inglaterra, aceptó la oferta – que le llegó a través de su amigo, el físico de origen ruso George Gamow – de una cátedra en la Universidad George Washington, situada en Washington D. C. Instalado allí, visitaba periódicamente la Universidad Johns Hopkins. Veamos lo que escribió al respecto en su autobiografía (*Memoirs*):

“Además de mis actividades diarias con Geo [Gamow] y mis estudiantes, también desarrollé lazos con la más amplia comunidad de físicos del área. Tomé parte en el seminario semanal del *Bureau of Standards* que tenía lugar en su viejo edificio de Connecticut Avenue; realicé todas las aportaciones que pude a las

discusiones y ocasionalmente sugerí conferenciantes. Dos veces al mes viajaba a Baltimore para un seminario [la distancia por carretera es de unos 62 kilómetros].

Papa Franck, como era conocido por el amplio grupo de jóvenes científicos que se habían convertido en sus amigos, había organizado un seminario quincenal. Como el número de científicos emigrados en Estados Unidos crecía continuamente, el seminario desarrolló el sabor de reuniones. James Franck, mi antiguo espónsor de los días de Göttingen (que había dimitido de su puesto allí en 1933 en protesta por las políticas de Hitler), había aceptado un puesto en la Universidad Johns Hopkins. Hertha Sponer, mi formidable amiga de Göttingen, había encontrado un puesto en Duke, lo mismo que Lothar y Traute Nordheim, mis amigos de la pensión de Stegemühlenweg.

En el seminario volví a encontrarme con María Goeppert Mayer [...] Además de ser una física extremadamente capaz, María era también muy bella. Esbelta y rubia, poseía una delicadeza y gracia natural, así como una considerable fortaleza mental”.

A continuación, Teller se refería al matrimonio de María con Joseph Mayer, añadiendo, no de manera completamente exacta, que “en los años siguientes, se había ocupado de sus dos hijos pequeños”. Y continuaba, ya más correctamente (recordemos que inicialmente de lo que se ocupó fue de la química-física, no de la física): “María no había regresado a la física porque el cuerpo de conocimientos había crecido considerablemente desde sus días de estudiante. Le di algunos tutoriales y ánimo y pronto nos hicimos buenos amigos”. Efectivamente, Teller la ayudó a introducirse en el nuevo campo de la física nuclear.

La física nuclear

En la actualidad está tan extendido el conocimiento de la estructura atómica, el que un átomo se compone de una capa electrónica formada por diferentes niveles por los que “transitan” los electrones (la realidad cuántica es más compleja de lo que puede inducir a pensar la palabra “transitar”; en realidad se trata de “nubes de probabilidad”), capa que rodea a un núcleo compuesto por protones y neutrones (sin carga), que tendemos a pensar que una vez que Rutherford propuso el modelo planetario, éste se estructuró de semejante manera. Y sin embargo, el neutrón no aparecía ni en el modelo de Rutherford ni en el de Bohr; de hecho, ni siquiera había sido descubierto. Una vez que Rutherford propusiera el modelo planetario y que Bohr presentase su modelo atómico, la creencia general era que los núcleos atómicos estaban formados por protones y electrones, una idea que desde luego favorecía la emisión por parte de las sustancias radiactivas de rayos β (electrones); por tanto, aparentemente, la denominada “desintegración β ” implicaba que salían electrones de los núcleos atómicos. Todavía no se sabía que existían los neutrones, ni los neutrinos, ni que la desintegración β , una forma común de radiactividad, tiene lugar vía la interacción débil (la responsable de los procesos radiactivos), en

un proceso en el que un neutrón del núcleo atómico se convierte en un protón, emitiendo un electrón que se mueve con gran rapidez y un neutrino (también puede implicar la transformación de un protón en un neutrón, emitiendo un antielectrón, o “positrón”, y un antineutrino). Fue Enrico Fermi quien proporcionó en 1933-1934 la explicación de la desintegración β .

Aunque Irène y Frédéric Joliot-Curie estuvieron cerca de identificar el neutrón (componente del núcleo atómico predicho inicialmente por Rutherford en 1920), no supieron interpretar el significado de un experimento que habían realizado en enero de 1932 en el que comprobaron que la radiación emitida por una fuente de polonio provocaba la emisión de protones de una capa de parafina. “La interpretación del fenómeno”, escribían al final de su nota, “se hace difícil por el hecho de que no se puede estimar más que muy imperfectamente la energía de los fotones emitidos [...]”. Cualquiera que sea la interpretación que se pueda dar a este fenómeno, es verosímil que tenga lugar para todas las radiaciones de energía cuántica muy elevada, en particular para los rayos cósmicos, si son de naturaleza electromagnética [...]. Parece pues establecido por estas experiencias que una radiación electromagnética de alta frecuencia es capaz de liberar, en los cuerpos hidrogenados, protones animados de una gran velocidad”. Perdieron así una ocasión única, dejando abierto el camino un colaborador de Rutherford en el Cavendish: James Chadwick (1891-1974).

En 1911, el mismo año en el que Rutherford publicó su artículo sobre el modelo atómico, Chadwick se graduó en Manchester, permaneciendo allí para trabajar en el campo de la radiactividad bajo la dirección del propio Rutherford. En 1913, poco después de recibir un máster en ciencias, se trasladó a Berlín para trabajar con Hans Geiger, antiguo miembro del grupo de Rutherford en Manchester. Sin embargo, no fue un buen momento para viajar a Alemania ya que poco después comenzaba la Primera Guerra Mundial, y Chadwick fue internado, permaneciendo en tal condición hasta el final de la contienda (1918) en Ruhleben, un campo de carreras de caballos situado a unos cuatro kilómetros al oeste de Berlín, muy cerca del suburbio industrial de Spandau, convertido en centro de internamiento.

Tras la guerra, Chadwick volvió a Manchester con Rutherford, pero cuando éste fue designado, en abril de 1919, director del Cavendish, pidió a su colaborador que le acompañase, lo que Chadwick aceptó. Fue durante los años que permaneció en Cambridge cuando Chadwick descubrió el neutrón. El “disparadero” para ello fue el artículo que Irène y Frédéric Joliot-Curie habían publicado en *Comptes rendus* del 18 de enero de 1932: Chadwick no dudó en ningún momento de las observaciones de los Joliot-Curie; sí lo hizo, sin embargo, de la explicación que ellos ofrecían, para él era evidente que los protones eran emitidos como resultado del choque de neutrones. Y lo anunció en una nota que publicó en *Nature* el 27 de febrero de 1932 titulada: “Possible existence of a neutron”. A este artículo le

seguiría otro más extenso en los *Proceedings of the Royal Society*, con el ya más firme encabezamiento de: “The existence of a neutron”. Merece la pena citar algunos párrafos de la nota de *Nature*: “Estos resultados, al igual que otros que he obtenido en el curso de este trabajo, son muy difíciles de explicar en la hipótesis de que la radiación que sale del berilio es un cuanto de radiación, producido en una colisión que conserva la energía y momento. Sin embargo, las dificultades desaparecen si se supone que la radiación está formada por partículas de masa 1 y de carga 0; es decir, por neutrones. Se puede suponer que la captura de la partícula α por el núcleo de ${}^9\text{Be}$ da lugar a la formación de un núcleo ${}^{12}\text{C}$ y a la emisión de un neutrón”.

El neutrón entraba de esta manera en el entonces todavía extremadamente elitista universo de las partículas elementales (formado por electrones, protones y fotones, a los que se podría añadir el neutrino), y su descubridor, James Chadwick, recibiría como recompensa el Premio Nobel de Física correspondiente a 1935.

A este pequeño grupo de partículas “elementales” se unió aquel mismo año de 1932 otra nueva: el positrón, el primer ejemplo de antimateria, estado cuya existencia se deducía de la ecuación relativista del electrón que Paul Dirac había obtenido en 1928.

En 1931, utilizando una cámara de niebla, el físico estadounidense Carl Anderson (1905-1991) obtenía las primeras fotografías de los misteriosos rayos cósmicos que habían sido observados por primera vez en 1911 por el físico austriaco Victor Hess, quien publicó sus resultados un año más tarde. Anderson advirtió que en sus fotografías aparecían, con frecuencia parecida, trazas que debían corresponder a partículas de carga opuesta; pero pensó, junto a Robert Millikan (su jefe en el California Institute of Technology, y un hombre con ideas muy particulares sobre la naturaleza de la radiación cósmica), que las partículas de carga positiva serían protones. Sin embargo, estudios más detallados (medidas de la ionización y de la curvatura de las trazas) mostraron que al menos algunas de las trazas dejadas por las partículas no podían deberse a protones. Finalmente, Anderson publicó un breve artículo en el número del 9 de septiembre de 1932 de la revista *Science*, órgano de la American Association for the Advancement of Science. Se titulaba “La aparente existencia de positivos que se pueden desviar fácilmente”, un ambiguo y bastante oscuro título que revela las reservas que, a pesar de todo, albergaba. Aun así, escribía:

“Para la interpretación de estos efectos [las trazas de las fotografías que había tomado] parece necesario recurrir a partículas cargadas positivamente que tengan una masa comparable a la del electrón, o bien admitir la aparición casual en la misma fotografía de trazas independientes situadas de tal manera que indiquen un punto común de origen de dos partículas. Esta última posibilidad es muy improbable en base estadística”.

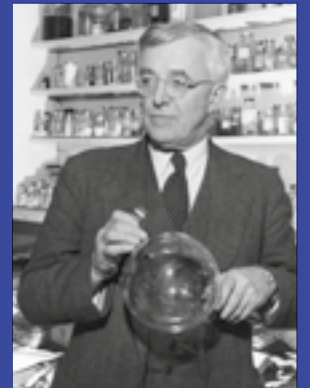
Unos meses después, el 28 de febrero de 1933, aparecía un nuevo artículo suyo, titulado “El electrón positivo” (Anderson 1933), aunque en él ya utilizó el



Walter Nernst



Joseph John Thompson



Irving Langmuir



Hans Bethe



James Chadwick



Frédéric Joliot e Irène Curie (1934)



Otto Hahn y Lise Meitner

nombre *positrón*. Las dudas de su nota de *Science* – motivadas, señalaba, “por la importancia y sorprendente naturaleza del anuncio” – ya habían desaparecido.

Procedente de la química, no de la física, en 1932 tuvo lugar otro avance importante para la física nuclear: el descubrimiento del “hidrógeno pesado”, esto es, el deuterio, un isótopo estable del hidrógeno. Su descubridor, Harold Urey (1893-1981), quien influyó, como veremos más adelante, en la carrera de María Goeppert Mayer, anunció el hallazgo en un artículo (“A Hydrogen isotope of mass 2”) publicado en *Physical Review* junto a sus colaboradores F. G. Brickwedde y G. M. Murphy. Solo dos años más tarde, Urey recibió el Premio Nobel de Química. (Mientras que el isótopo más abundante del hidrógeno – denominado también protio – tiene en el núcleo únicamente un protón, el del deuterio posee un protón y un neutrón); el núcleo del deuterio – esto es cuando se desprovee al átomo de deuterio del electrón que rodea su núcleo – se denomina “deuterón”).

En el primero de los tres artículos que Hans Bethe publicó en *Review of Modern Physics* en 1936-1937 (el primero lo firmó con R. F. Bacher, el segundo el solitario y el tercero junto a M. Stanley Livingston), en los que resumía y desarrollaba el estado en que se encontraba entonces la física nuclear, y que fueron denominados “la Biblia de Bethe”, se explicaba la importancia del deuterón para la física nuclear:

“El deuterón desempeña en la física nuclear el mismo papel que el átomo de hidrógeno en la física atómica. Está formado por dos partículas elementales, un protón y un neutrón. Es bien sabido que cualquier problema de dos cuerpos puede integrarse explícitamente si se conoce la fuerza entre las dos partículas como una función de la distancia entre las partículas. Por tanto, los resultados teóricos sobre el deuterio están libres de aproximaciones hechas para simplificar el tratamiento matemático. Son, como veremos, también en una gran medida independientes de las suposiciones que hacemos sobre los detalles de la fuerza entre neutrón y protón [...]. La teoría del deuterón es por consiguiente más adecuada para comparaciones cuantitativas con experimentos, y en consecuencia para comprobar las ideas subyacentes acerca de la estructura nuclear, que cualquier otra parte de la teoría nuclear”.

También en 1932 tuvo lugar otro desarrollo que impulsó el estudio de los núcleos atómicos, esto es, de la física nuclear. Durante mucho tiempo las partículas α fueron el único medio de que se disponía para perturbar de manera controlada los átomos; pero para su producción se estaba a merced de elementos que fuesen radiactivos de manera natural. Las fuentes radiactivas de que se disponía eran demasiado débiles para seguir penetrando en los misterios del núcleo. Un gramo de radio emitía, aparte de otros productos de su desintegración, 37.000 millones de partículas α por segundo, de las cuales una de cada 100.000 llevaba a una transformación; muy pocas para que se pudiesen separar químicamente las sustancias generadas y examinar así los productos. Además, la energía de estas partículas α ape-

nas permitía superar la repulsión eléctrica de los núcleos (cargados positivamente) a los que se dirigían. El grupo de Rutherford en el Laboratorio Cavendish de Cambridge descubrió que cuanto más rápidamente viajaban las partículas α más transformaciones generaban. Era, por consiguiente, urgente conseguir máquinas que aumentasen el número y velocidad de las partículas. Y como las partículas α tienen carga, una forma de conseguir esto era someterlas a fuertes diferencias de potencial. No fue hasta la década de 1920 cuando comenzaron a aparecer algunos instrumentos que cumplían tal función, pero fue sólo en 1932 cuando John Cockcroft y Ernest Walton diseñaron un aparato (multiplicador voltaico) –que les proporcionó 125.000 voltios– suficiente para comprobar que isótopos de litio, de masa 7, bombardeados con protones, se rompían en dos partículas α (recordemos, núcleos de helio). Fue la primera desintegración producida de manera artificial.

Con anterioridad al generador de Cockcroft y Walton, hacia 1928, Merle Tuve, del Departamento de Magnetismo Terrestre de la Carnegie Institution de Washington D. C., había empleado un transformador inventado por Nikola Tesla, con el que alcanzó una diferencia de potencial de 3 millones de voltios (V). En colaboración con Gregory Breit, Tuve utilizó este método para acelerar protones y electrones. Tras trabajar durante un breve periodo de tiempo en una planta eléctrica en Alabama, Robert J. van de Graaff diseñó su generador electrostático, y después de permanecer un año en Oxford con una beca, lo adaptó en Princeton (adonde llegó en 1928) para la aceleración de partículas. Pronto su prototipo alcanzó los 80 kV (1 kV = 1.000 V), llegando en 1931 a los 750 kV, y utilizando dos esferas se podía conseguir una diferencia de potencial de 1,5 MV (1 MV=1.000 kV). En 1937 ya existían generadores de Van de Graaff de cerca de 5 metros de altura, que alcanzaban los 5 millones de voltios. En 1933, Tuve y su grupo utilizaron un generador de Van de Graaff de un millón de voltios junto al tubo de descarga que ellos mismos habían perfeccionado y observaron la desintegración del litio y del boro. Pero la iniciativa más importante, la que terminaría desarrollándose más y marcando una nueva época de la física, fue la asociada al nombre de Ernest Orlando Lawrence (1901-1958).

Después de graduarse en Yale, Lawrence fue contratado como profesor asociado de física por Berkeley en 1928. El año siguiente, mientras ojeaba la revista *Archiv für Elektrotechnik* se encontró con un artículo del ingeniero noruego Rolf Wideröe (1902-1996), estudiante de doctorado en el Politécnico de Aquisgrán, cuyas ilustraciones le sugirieron la idea del ciclotrón (Lawrence sabía poco alemán). Wideröe – que manejaba este tipo de ideas desde al menos 1922 – había construido un tubo *lineal* para acelerar partículas, dividido en dos partes y alimentado por una señal eléctrica alterna de 25.000 voltios (en 1922, estando en Karlsruhe, con el mismo fin, había considerado tubos de geometría circular, que denominó *Straahtransformator*, o “transformador de rayo”). Cuando las partículas cargadas entraban en el tubo, llegaban a la primera zona en la que el campo eléctrico las aceleraba con un empuje de 25.000 voltios; en este momento, el campo en la

segunda zona apuntaba en la dirección contraria, pero cuando las partículas en cuestión llegaban a esa segunda zona, el campo había cambiado de signo, con lo que obtenían otros 25.000 voltios de empuje; en total 50.000 V, a partir de una diferencia de potencial de 25.000 V.

En esencia, lo que Lawrence hizo fue centrarse en las geometrías circulares inicialmente consideradas por Wideröe para la cámara aceleradora, pero con varios avances, uno de ellos la utilización de un campo magnético que permitía que las partículas se moviesen siguiendo trayectorias circulares; haciendo que el campo eléctrico invirtiera su polaridad cada media vuelta, para que el empuje tangencial fuera el adecuado, se conseguía que las partículas fuesen aumentando su energía con cada revolución. Naturalmente, al ir moviéndose con mayor velocidad las partículas también irían describiendo en cada vuelta círculos más amplios, pero independientemente de la rapidez con que se movieran resultaba que siempre tardaban el mismo tiempo en cada revolución (la frecuencia de rotación de la partícula era independiente del radio de su órbita), lo que permitía mantener la misma frecuencia de inversión del voltaje, que así siempre estaba en resonancia con los ciclos de la partícula. Este “principio de resonancia” fue en realidad lo que posibilitó la construcción del ciclotrón, un término éste, por cierto, que Lawrence utilizó durante un tiempo de manera informal, prefiriendo en las notas más formales el de “acelerador de resonancia magnética” (hasta 1936 no se estableció como el nombre oficial).

Probada la idea con un prototipo de diseño artesanal (construido por Nels Edlefsen, uno de los estudiantes de Lawrence, cuyo coste se ha estimado en unos 25 dólares) se necesitaba de mayores estudios para su desarrollo. En semejante tarea, Lawrence contó con la colaboración de sus estudiantes, especialmente con la de Stanley Livingston, que dedicó su investigación doctoral a este fin. A finales de 1930, Lawrence y Livingston completaban la construcción del ciclotrón: medía unos 12 centímetros de diámetro, lo probaron el 2 de enero de 1931, y aplicando un voltaje de 2.000 voltios, lograron obtener protones con energías de 80 kV.

Enseguida, Lawrence anunció que esperaba poder alcanzar el millón de voltios de energía, e incluso más, si se le facilitaba la construcción de aparatos más elaborados. El presidente de la Universidad reaccionó nombrando catedrático (*full professor*) a Lawrence, a pesar de la oposición de los miembros no científicos del claustro. Tenía entonces sólo 29 años. (Fue en esta etapa de sus desarrollos cuando conoció el éxito del experimento de Cockcroft y Walton.)

A partir de aquel momento comenzó una de las carreras más intensas y, en diversos sentidos, innovadora de la historia de la ciencia. Innovadora no tanto por las ideas científicas que surgieron sino por la metodología, por el talante con que hubo que afrontar la organización de la construcción de ciclotrones. Para poder fabricar esas máquinas se necesitó un carácter como el de Lawrence: emprendedor, ambicioso, mirando siempre hacia adelante, hacia máquinas cada vez

más poderosas, dispuesto a buscar recursos económicos para financiar sus proyectos, abierto y conocedor de la técnica. Las cualidades de Lawrence resultaron ser tremendamente convenientes para avanzar en la dirección que la realidad física había impuesto a la investigación científica en el dominio de las partículas elementales, de las “altas energías”, ya que lejos de agotarse este dominio con electrones, protones, neutrones, fotones, positrones y neutrinos, la materia continuó reaccionando ante cada nuevo salto energético, mostrando nuevos elementos, nuevas partículas elementales. Se necesitaba una naturaleza como la de Lawrence para imponerse la tarea de construir máquinas cada vez más poderosas, más grandes (la *Gran Ciencia*), pero también para establecer el modelo de cómo dirigir, de cómo manejar, en este sentido, esa nueva ciencia.

En vista de todo esto, bien se puede decir que a partir de 1932, un auténtico *annus mirabilis*, la física nuclear se puso en marcha.

Y ahora podemos regresar a María Goeppert Mayer.

Columbia University

Cuando apareció *Statistical Mechanics*, (el libro de texto que escribieron durante el segundo embarazo de María), los Mayer ya no estaban en Johns Hopkins. A pesar de que Joseph Mayer era profesor asociado y llevaba en el puesto siete años, lo que en la mayoría de las universidades estadounidenses significaba que terminaría siendo profesor permanente (lo que allí se denomina *tenured track*), la universidad no estaba dispuesta a renovar su nombramiento. El motivo probable era la gran depresión económica que todavía afectaba al país, y de la que las universidades no se libraban. Mayer podía haber recurrido legalmente la decisión, pero no lo hizo, entre otras razones porque más o menos al mismo tiempo recibió dos ofertas de trabajo: una de la Universidad de Chicago y otra de la Universidad de Columbia (Nueva York). Y aunque Johns Hopkins le dio un margen de dos años, Joseph dimitió inmediatamente y aceptó la propuesta de Columbia, que llevaba aparejada el doble del salario que recibía en Baltimore. Peter Mayer nació en 1938, unos pocos meses antes de que sus padres y hermana se mudaran a Nueva York.

En la oferta de Columbia intervino Harold Urey, el químico-físico que, recordemos, descubrió el deuterio. Como Joseph Mayer, pero antes que él, Urey había sido estudiante de doctorado en Berkeley bajo la dirección de G. N. Lewis. Interesado en la física, en 1924 Urey eligió el Instituto de Bohr en Copenhague para disfrutar de una beca que le proporcionó la Fundación Americano Escandinava. Al regresar a Estados Unidos y aunque obtuvo una beca para Harvard (donde solo estuvo un mes), aceptó un puesto que le consiguió Lewis en la Universidad Johns Hopkins, donde permaneció hasta 1929 cuando pasó a la Universidad de Columbia, donde “fabricó” el deuterón. Coincidió, por consiguiente, con Joseph y María Mayer en Baltimore. Y ambos le impresionaron.

En Columbia la posición de María era en algunos aspectos peor que en Baltimore. De hecho, cuando se iba a publicar *Statistical Mechanics* y se consideró cómo iban a aparecer en los créditos los autores, se vio que María no tenía ningún título. Harold Urey pidió en una reunión del Departamento de Química – al que se había incorporado Joseph – que se le ofreciese un nombramiento honorífico, pero su propuesta fue rechazada. Urey hizo entonces que María diese algunas clases de química aquel semestre, permitiendo de esta manera que en el libro apareciese como *Lecturer in Chemistry. Columbia University*; Joseph Mayer figuraba (en primer lugar) como *Associate Professor of Chemistry. Columbia University*. El libro, por cierto, tuvo mucho éxito; en 1954, por ejemplo, se reimprimió por sexta vez.

Aunque carecía de puesto o título en Columbia, el director del Departamento de Física, George Pegram, dispuso que tuviese un pequeño despacho. Y a pesar de los inconvenientes señalados, María progresó como física en Columbia. Allí coincidió con físicos extraordinarios: Isidor Rabi, Jerrold Zacharias y, sobre todo, Enrico Fermi, a quien ya conocía de la Escuela de Verano de Ann Arbor de 1930. Aun así, entre 1940 y 1946 publicó tres artículos (aunque pueda parecer escaso, el mero número no es representativo, entre otras razones porque, como se verá, en los años de la guerra mundial estuvo ocupada con tareas que no implicaban la posibilidad de ser publicadas). El primero de estos tres artículos (1940, *Journal of Chemical Physics*) iba firmado con Brother Gabriel Kane, del Manhattan College de Nueva York; se trataba de una breve nota, “Lattice summations for hexagonal close-packed crystals”, que estaba relacionada con el artículo que había publicado con Hertzfeld en 1934 en *Physical Review* sobre la fusión de un cristal. El segundo, “Rare earth and transuranic elements”, *Physical Review* (1941), lo escribió en solitario y es particularmente interesante. Surgió de la propuesta que le hizo Fermi de que intentase predecir la estructura de la capa de valencia de los, aún por descubrir, elementos transuránicos. (Recordemos que en Italia Fermi había desarrollado un programa de investigación que consistía en lanzar neutrones lentos contra los diferentes elementos químicos y con el que, al bombardear los últimos elementos de la tabla periódica, esperaba obtener elementos más pesados que el uranio, elementos “transuránicos”.) Haciendo uso de una versión muy simple del modelo semiclásico que habían desarrollado Llewellyn Thomas y Enrico Fermi (modelo de Thomas-Fermi, o de Fermi-Thomas) para estudiar la estructura electrónica de sistemas de muchos cuerpos, Goeppert Mayer llegó a la conclusión de que esos elementos transuránicos formarían una nueva serie de tierras raras químicas. A pesar de las simplificaciones que hizo, su modelo resultó bastante ajustado en cuanto a las predicciones que se extraían de él para el comportamiento cualitativo de tales elementos químicos. El tercero de los artículos lo firmó con Kenneth J. McCallum, del Departamento de Química de Columbia: “Calculations of the absorption spectrum of Wurster’s salts”, *Review of Modern Physics* (1942).

**María progresó como física en Columbia.
Allí coincidió con físicos extraordinarios:
Isidor Rabi, Jerrold Zacharias y, sobre todo,
Enrico Fermi.**

Como se indicó en el capítulo 3, Enrico Fermi aprovechó su viaje a Estocolmo para recoger en diciembre de 1938 el Premio Nobel de Física, que había obtenido “por sus demostraciones de la existencia de nuevos elementos radiactivos producidos por la irradiación de neutrones y por su descubrimiento relacionado con las reacciones nucleares producidas por neutrones lentos”, para no regresar a su patria y trasladarse con su familia a Estados Unidos. Su destino fue el mismo que pocos meses después (en el otoño de 1939) tomaron Joseph y María Mayer: la Universidad de Columbia.

La coincidencia de la incorporación casi simultánea de los Mayer y los Fermi a Columbia hizo que se establecieran fuertes lazos de amistad entre las dos familias. Laura Fermi, una mujer dotada para la escritura, explicó en *Atoms in the Family* (otra obra suya de referencia es *Illustrious Immigrants*) que después de pasar los primeros seis meses de vida en Manhattan, no lejos de Columbia, y teniendo en cuenta que Enrico quería comprar una casa y no vivir alquilado, terminaron yendo a inspeccionar una zona residencial donde residían algunos de sus colegas, Leonia, una pequeña población situada en la cercana Nueva Jersey. Entre esos colegas se hallaba Harold Urey, al que fueron a visitar. “Harold Urey – recordó Laura Fermi – era un buen orador y nos vendió Leonia. Además, yo estaba deseosa de ir a vivir a donde la suciedad de las rodillas de mis hijos no fuera gris, como en Nueva York, sino un honrado marrón”. Y sucedió que al mismo tiempo que los Fermi compraron una casa en Leonia, lo hicieron también los Mayer. Y también Urey intervino en la decisión. En palabras de Joan Dash: “un día Joseph Mayer le dijo a María: ‘Varios colegas míos viven en una localidad llamada Leonia. Está en Nueva Jersey, justo después del Puente George Washington [...]. Vayamos a ver cómo es’. Era febrero y una tarde heladora. Tomamos un autobús y al bajarnos en la parada de Leonia el viento nos golpeó, cegándonos. No sabíamos a donde ir”. Y decidieron visitar a Harold Urey: “Los Urey estaban en su amplio salón de estar y tenían encendido un fuego. Nuestra visita fue un éxito [...]. El Dr. Urey nos habló extensamente, en su serio, ligeramente profesional tono, sobre Leonia y sus excelentes escuelas públicas, sobre las ventajas de vivir en una localidad de clase media donde los niños pueden tener todo lo que los otros niños tienen [...]. El verano siguiente éramos los felices propietarios de una casa allí, con una amplia parcela, un pequeño estanque y mucha humedad en el sótano”.

Como sucedió a menudo a lo largo de su vida, durante su estancia en Columbia María Goeppert Mayer estableció una estrecha relación con científicos

distinguidos; en este caso un “triángulo social” que la cercanía de hogares reforzaba: los Urey, los Fermi y los Mayer.

El descubrimiento de la fisión del uranio

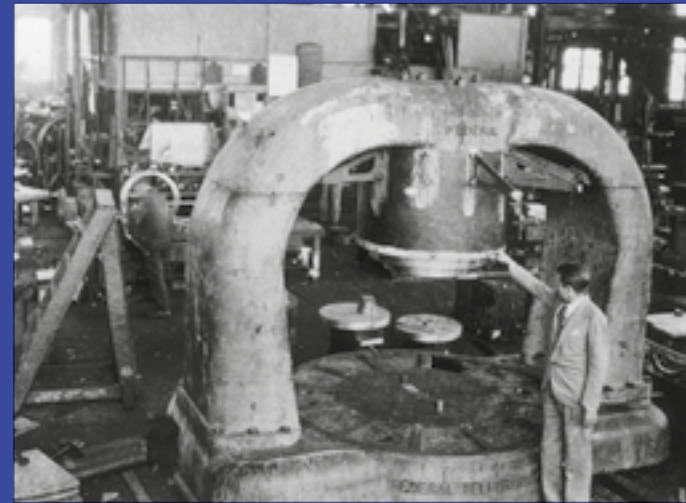
Prácticamente al mismo tiempo que Fermi llegaba a Nueva York, en Alemania tenía lugar un desarrollo científico de enormes consecuencias sociopolíticas: el descubrimiento de la fisión del uranio, estrictamente de su isótopo 235.

En el otoño de 1938, Otto Hahn, que investigaba en el Instituto de Química de la Asociación Káiser-Wilhelm situado en Dahlem, realizó una serie de experimentos, junto a su colaborador Fritz Strassmann, utilizando la misma metodología que había empleado Fermi en Italia y por la que obtuvo el Premio Nobel: bombardeaba con neutrones lentos al uranio. Para su sorpresa, Hahn y Strassmann observaron que obtenían bario, un elemento mucho más ligero – casi la mitad – que el uranio (el uranio tiene número atómico 92 y el bario, 56). Parecía que el núcleo de uranio se había partido en dos, que se había *fisionado*. Pero jamás se había observado algo parecido; las transmutaciones atómicas descubiertas hasta entonces involucraban transformaciones de un elemento a otro cercano a él en la tabla periódica. El 6 de enero de 1939 publicaban en *Naturwissenschaften* el correspondiente artículo en el que manifestaban sus dudas ante sus “peculiares resultados [...]”. Como químicos debemos afirmar que los nuevos productos son bario [...]. Sin embargo, como químicos nucleares, que trabajan muy próximos al campo de la física, no podemos decidarnos a dar un paso tan drástico y que va en contra de todos los experimentos realizados anteriormente en la física nuclear. Acaso se hayan dado una serie de coincidencias poco habituales que nos han proporcionado indicaciones falsas”.

Lise Meitner, la colaboradora durante 30 años de Hahn, pero que debido a su origen judío había tenido que abandonar el Instituto y Alemania cuando ésta se anexionó Austria, se encontraba entonces en Estocolmo y fue la primera en enterarse por medio de una carta que le envió Hahn. Su sobrino, el físico Otto Frisch, que había ido a pasar con su tía las vacaciones de Navidad en la pequeña ciudad de Kungälv (cerca de Gotemburgo) y con quien Meitner interpretaría los nuevos resultados, describió la reacción de Lise y los acontecimientos que siguieron inmediatamente:

“Cuando salí de la habitación del hotel [...] encontré a Lise Meitner enfrascada en una carta de Hahn y visiblemente preocupada. Quise contarle un experimento nuevo que estaba planeando, pero sin prestarme atención me dio a leer la carta. Lo que decía era realmente tan asombroso que al principio me mostré escéptico [...].

¿Un simple error? Lise Meitner opinaba que no; Hahn era un químico demasiado bueno para cometerlo. Pero, ¿cómo podía formarse entonces bario



Ernest O. Lawrence con el gran imán que necesitaba uno de sus ciclotrones



Instrumentos con los que Hahn y Strassmann descubrieron la fisión del uranio

Ernest O. Lawrence con unos de sus primeros ciclotrones



Carl Anderson

a partir de uranio? De los núcleos no se habían extraído jamás fragmentos más grandes que protones o núcleos de helio (partículas alfa), y para arrancar gran número de ellos ni siquiera había energía suficiente. Tampoco era posible que el núcleo de uranio se hubiera dividido sin más en dos. Un núcleo no era como un sólido quebradizo que se pudiese romper o partir; George Gamow había sugerido años atrás que el núcleo podía ser más bien como una gota líquida, y Bohr había dado argumentos que lo apoyaban. ¿No sería que la gota se dividía de manera más gradual en dos más pequeñas, adoptando primero una forma alargada, adelgazando luego por el centro y estirándose finalmente en dos fragmentos en lugar de romperse bruscamente? Sabíamos que había fuerzas intensas que se oponían a ese proceso, igual que la tensión superficial de una gota líquida se opone a que se divida en dos más pequeñas. Pero los núcleos diferían de las gotas de líquido en un aspecto importante: tenían carga eléctrica y se sabía que la carga contrarrestaba la tensión superficial”.

Esta idea resultó clave. Inmediatamente, en medio de la nieve, Frisch y Meitner empezaron a garabatear números, viendo que la carga de un núcleo de uranio efectivamente era suficiente para superar casi por completo el efecto de la tensión superficial, de manera que el núcleo de uranio podía asemejarse realmente a una gota muy temblorosa e inestable, lista para dividirse a la menor provocación, como podría ser el impacto de un solo neutrón. Con la ayuda de la fórmula einsteniana $E=mc^2$, pudieron explicar otros detalles, llegando a la conclusión de que eran capaces de entender el fenómeno descubierto por Hahn y Strassmann, ¡y todo antes de que se hubiese publicado el artículo de éstos! El correspondiente artículo fue enviado a *Nature* donde se publicaría el 18 de marzo de 1939.

Dos días después de resolver el enigma Frisch se marchó a Copenhague, deseoso de hacer partícipe a Niels Bohr de estos desarrollos. El danés enseguida comprendió la idea, entusiasmándose con ella. Ocurría que Bohr estaba a punto de embarcar rumbo a Estados Unidos, para pasar tres meses en la Universidad de Princeton, en New Jersey, en donde iba a explicar la teoría cuántica de la medida. Con él iban su hijo Erik y su estrecho colaborador, Léon Rosenfeld. El 16 de enero el barco llegaba a Nueva York, en donde le esperaban John Wheeler y Enrico y Laura Fermi. Nada más desembarcar, todavía en el muelle, Bohr dijo unas palabras a John Wheeler sobre las noticias que Frisch le había traído. Niels y Erik se fueron entonces con los Fermi para una breve estancia en Nueva York, antes de trasladarse a Princeton, mientras que Wheeler acompañó en tren a Rosenfeld hasta esta pequeña población de New Jersey. En el camino Wheeler convenció al colaborador de Bohr para que diese una charla en Princeton sobre el descubrimiento de Hahn y Strassmann, la interpretación de Meitner y Frisch, y la conclusión que Bohr había desarrollado con Rosenfeld durante la travesía, de que el nuevo proceso encajaba bien con el modelo de núcleo compuesto de Bohr que explicaba las reacciones nucleares, todo ello ignorado en Estados Unidos. La descripción de Rosenfeld causó una gran excitación, y malestar a Bohr cuando

supo de ella, ya que quería proteger el trabajo de Meitner y Frisch hasta que fuese publicado (lo sería el 11 de febrero), al igual que unos experimentos que Frisch estaba realizando en Copenhague; por este motivo no había dicho nada a Fermi. En palabras de Rosenfeld: “El efecto de mi charla a los físicos americanos fue más espectacular que el propio fenómeno de fisión. Se apresuraron a propagar la noticia en todas direcciones y muy pronto los fragmentos de la fisión habían sido vistos en los osciloscopios de varios laboratorios de los Estados Unidos, una llamativa demostración que era bastante fácil de producir”.

Efectivamente, una vez conocidas las noticias, los físicos norteamericanos se lanzaron con furor a explotar la nueva veta descubierta, dando la razón a Bohr en sus temores. Un miembro del equipo de Fermi en Columbia, Herb Anderson, se dispuso a realizar los mismos experimentos que Frisch estaba efectuando en Copenhague para estudiar mejor los productos de la fisión, y el 26 de enero Fermi habló sobre la fisión en una pequeña reunión de física teórica celebrada en Washington, D. C., patrocinada por la Universidad George Washington y la Fundación Carnegie, sin mencionar a Frisch, algo que enfureció a Bohr, también presente en la reunión. A finales del mes la noticia llegaba a los periódicos; el día 29, por ejemplo, el *New York Times* se ocupaba de ella.

En la costa oeste también se recibían las noticias. El 28 de enero, Robert Oppenheimer, el futuro líder del proyecto Manhattan, escribía a William Fowler: “El asunto del U [uranio] es increíble. Nos enteramos de él en primer lugar por los periódicos, telegrafiamos pidiendo más información y hemos recibido muchos informes desde entonces. Ya sabes que comenzó con el hallazgo de Hahn de que lo que había tomado por Ra [radio] en una de las actividades del U, resultó ser Ba [bario] [...]. Muchos puntos están todavía oscuros [...]; ¿de cuántas maneras se rompe el U? ¿Aleatoriamente, como se podría esperar, o solamente de ciertas maneras? Y lo más importante de todo, ¿se emiten muchos neutrones de la ruptura, o de las piezas resultantes?”.

Este último punto era esencial, ya que si en la reacción descubierta por Hahn y Strassmann se producía más de un neutrón, entonces era imaginable pensar que se podía desencadenar una reacción en cadena (los neutrones liberados podían colisionar con más de un núcleo de uranio, liberando en cada caso energía y neutrones, y así sucesivamente). Igualmente, era posible pensar que se podría producir en fracción de segundos una gran cantidad de energía, que permitiese, en el caso de una reacción en cadena más o menos incontrolada, fabricar un arma tremendamente poderosa, o, si se pudiese controlar y liberar poco a poco, una fuente energética, un reactor nuclear, utilizable con fines pacíficos. Pero para los físicos implicados en el asunto, aunque estas ideas eran imaginables y, por consiguiente, acaso posibles, su realización se veía muy alejada en el futuro. Como se decía en el número de octubre de 1939 de la revista de divulgación científica *Scientific American*: “La producción de energía mediante la fisión nuclear no pasa del ámbito

de lo posible. Bajo las condiciones actuales, el proceso es tan poco eficiente como sacar arena de una playa grano a grano”.

Un problema importante era que la fisión del uranio producida por neutrones tenía lugar en el isótopo 235 del uranio, el menos abundante en la naturaleza. (La proporción del U-235 es del 0,72 por ciento, mientras que la del U-238 es de 99,28 por ciento.) Si se pretendía aprovechar el proceso más allá de los experimentos, era imperativo resolver este problema.

La cuestión del número de neutrones emitidos en cada fisión se abordó con celeridad, obteniéndose en París (Joliot-Curie) el valor medio de 3,5, mientras que en Columbia (Fermi) eran 2 los neutrones contabilizados. El camino hacia la reacción en cadena continuaba, por consiguiente, estando abierto. Pero todavía era demasiado pronto para que los científicos lo abordaran plenamente. Hubo que esperar a que Estados Unidos entrara en la Segunda Guerra Mundial, aunque algunos entendieron pronto que había que seguir esa senda lo antes posible, a la cabeza de ellos el activo, perspicaz y original físico húngaro, de origen judío, Leo Szilard (1898-1964).

Cuando Hitler llegó al poder, Szilard (entonces *privatdozent* en la Universidad de Berlín) no tuvo dudas de lo que iba a ocurrir, y a partir de ese momento tuvo preparadas sus maletas. Pocos días después del incendio del Reichstag (el 27 de febrero de 1933), abandonaba Berlín camino de Viena, en un tren casi vacío. Un día más tarde el mismo tren iba totalmente lleno. Tras pasar por Viena, Szilard se instaló en Londres. Poco después de haber llegado a la capital inglesa, se celebró (septiembre de 1933), la reunión anual de la British Association for the Advancement of Science, y Szilard leyó en los periódicos que Rutherford había manifestado allí que quien hablase de la utilización industrial de la energía procedente de los átomos era poco menos que un lunático. Este comentario animó a Szilard a pensar sobre el tema y, como recordó en un escrito autobiográfico, “de repente se me ocurrió que si pudiésemos encontrar un elemento al que se le pudiese partir mediante neutrones y que emitiese *dos* neutrones cuando absorbiese un neutrón, tal elemento, reunido en masa suficiente, podría mantener una reacción nuclear en cadena”. Poco después, Frédéric e Irène Joliot-Curie descubrían la radiactividad artificial, y Szilard veía más claramente cómo se podía explorar la posibilidad de una reacción en cadena, aunque no consiguió suscitar muchos entusiasmos. Probó primero con el berilio, pero sin éxito. A pesar de no ser capaz de encontrar un candidato, su sentido comercial (y político) le llevó a solicitar en la primavera de 1934 una patente para las leyes que, según él, gobiernan una reacción en cadena. Consciente de lo que sus ideas implicaban y no deseando que éstas fuesen accesibles libremente, asignó la patente al Almirantazgo británico, la única manera de evitar su difusión. La patente (*Improvements in or relating to the transmutation of chemical elements*) fue aceptada el 12 de diciembre de 1935. Hasta finales de 1937 Szilard permaneció, con alguna ausencia, en Inglaterra,

donde llegó a lograr una pequeña beca en Oxford; prácticamente en solitario continuó pensando en la reacción en cadena.

Viendo que la guerra estaba próxima, Szilard se trasladó a Estados Unidos, adonde llegó el 2 de enero de 1938, sin tener ningún trabajo. Allí tuvo noticia, a través de Eugene Wigner, del descubrimiento que Hahn y Strassmann habían realizado a finales de ese año. Pocas personas en el mundo podían apreciar mejor que él las consecuencias del hallazgo. A partir de aquel momento comenzó una etapa intensa y complicada, en la que Szilard se movió con rapidez entre sus colegas estadounidenses, manteniendo, asimismo, correspondencia con otros en Inglaterra y Francia (Joliot-Curie). Expresado brevemente, Szilard quería que se comprobase inmediatamente, como él pensaba, si la fisión producía neutrones y que, en caso de que así fuese, que no se publicasen los resultados para evitar que los alemanes tuviesen conocimiento de ello. Fermi, que pronto comprobó que, efectivamente, se producían neutrones, no estaba a favor de esta táctica; Edward Teller sí. Pero mientras discutían al respecto, y estando Fermi ya convencido, en marzo de 1939 Joliot-Curie publicó, junto a sus colaboradores Hans von Halban, jr., y Lew Kowarski, una nota en *Nature* en la que se señalaba claramente que en la fisión del uranio se emitían neutrones, indicándose además que esto podía llevar a una reacción en cadena. Fermi entonces se decantó claramente en favor de publicar. El mismo mes de marzo de 1939 en que apareció la nota de *Nature*, las tropas alemanas tomaban lo que quedaba libre de Checoslovaquia.

En abril prosiguieron los experimentos de los grupos de París y de Columbia, encontrándose que el número de neutrones era de dos o tres, con lo que la posibilidad de la reacción en cadena se confirmaba aún más. Ese mismo mes, científicos estadounidenses, británicos, alemanes y franceses solicitaban ayuda a sus respectivos gobiernos para investigar la fisión, pidiéndoles asimismo que vigilaran los abastecimientos de uranio. No es que estuviesen convencidos de que fuese posible una reacción en cadena altamente explosiva, tal idea era patrimonio de muy pocos, pero algunos sí que pensaban que la fisión podría conducir a una fuente energética para ser utilizada en la industria o en submarinos.

En julio, después de haber permanecido tres meses como científico invitado en Columbia, participando en los experimentos del grupo de Fermi, y encontrándose de nuevo sin trabajo, Szilard se reunió con Wigner en Nueva York. Los dos científicos húngaros estaban cada vez más convencidos de que el peligro era real y comenzaron a preocuparse por los suministros de uranio, en particular por lo que podría ocurrir si los alemanes tuviesen acceso a los grandes yacimientos del Congo belga. Pensando en qué canales podrían utilizar para advertir al Gobierno de Bélgica que no vendiesen uranio a Alemania, se le ocurrió a Szilard que Einstein conocía a la reina de los belgas. Inmediatamente propuso a Wigner que fuesen a verle para informarle de la situación y pedirle que considerase escribir a la reina.

Einstein estaba de vacaciones en Peconic (estado de Nueva York), pero pronto le encontraron. Era la primera vez que el genial físico oía hablar – recordó años más tarde Szilard – de la posibilidad de una reacción en cadena, pero entendió enseguida la idea y sus implicaciones. Sin embargo, no le agradaba escribir a la reina, aunque sí se ofreció a hacerlo a un miembro del Gobierno belga al que conocía. Iba a hacerlo cuando Wigner sugirió que no sería apropiado dirigirse a un Gobierno extranjero sin antes comunicárselo al Departamento de Estado americano. Se acordó entonces que Einstein enviase un borrador de la carta que pensaba dirigir a los belgas, junto a una nota indicando que si no recibía ninguna noticia en dos semanas enviaría la carta a Europa. Con este acuerdo se separaron, quedando en investigar cómo aproximarse al Departamento de Estado.

Fue, una vez más, Szilard quien avanzó en esta dirección. Consiguió entrar en contacto con un consejero de la Lehman Corporation, Alexander Sachs, que de hecho ya había oído de los nuevos desarrollos antes de ser visitado por Szilard, e incluso señalado su importancia al presidente. Sachs le aconsejó que Einstein escribiese directamente al presidente Roosevelt y que él personalmente le haría llegar la carta.

Utilizando el borrador de carta que había preparado Einstein, Szilard preparó una versión para el presidente Roosevelt, que presentó el 30 de julio a Einstein, quien seguía de vacaciones. Le acompañó en el viaje a Peconic Edward Teller, al que Szilard pidió que le llevase en su coche (“entré en la historia como chofer de Szilard”, bromeó en cierta ocasión Teller). Allí, ambos discutieron con Einstein el contenido de la carta a Roosevelt. La famosa misiva fue escrita finalmente el 2 de agosto de 1939, y merece la pena reproducirla en su totalidad (la carta de Einstein iba acompañada de otra de Szilard a Sachs, fechada el 15 de agosto, a la que iba unida un *memorandum* de cuatro páginas al presidente, también de Szilard y con la misma fecha):

“Señor:

Trabajos recientes de E. Fermi y L. Szilard, que me han sido comunicados en manuscrito, me hacen esperar que el elemento uranio pueda convertirse en una nueva e importante fuente de energía en el futuro inmediato. Ciertos aspectos de la situación que se ha producido exigen que se la vigile cuidadosamente y, si es necesario, que la Administración actúe rápidamente. Creo, por consiguiente, que es mi deber llamar su atención sobre los siguientes hechos y recomendaciones:

En el curso de los últimos cuatro meses se ha hecho probable – a través del trabajo de Joliot en Francia, al igual que de Fermi y Szilard en América– que pueda ser posible establecer una reacción nuclear en cadena en una gran masa de uranio, mediante la cual se generarían vastas cantidades de energía y grandes cantidades de nuevos elementos del tipo del radio. Parece ahora casi seguro que esto podría conseguirse en un futuro inmediato.

Este nuevo fenómeno conduciría también a la construcción de bombas y es concebible –aunque mucho menos seguro– que de esta manera se puedan construir bombas de un nuevo tipo extremadamente poderosas. Una sola bomba de este tipo, transportada por barco y hecha explotar en un puerto, podría muy bien destruir todo el puerto junto a parte del territorio que le rodease. Sin embargo, tales bombas podrían ser demasiado pesadas como para que se las pudiese transportar por aire.

Estados Unidos solamente tiene yacimientos muy pobres de uranio en cantidades moderadas. Existe algún buen yacimiento en Canadá y en la antigua Checoslovaquia, mientras que la fuente de uranio más importante se encuentra en el Congo Belga.

En vista de esta situación, acaso pueda usted considerar aconsejable que exista algún contacto permanente entre la Administración y el grupo de físicos que trabajan en reacciones en cadena en Estados Unidos. Una forma posible de lograr esto sería que se confiase esta tarea a una persona de su confianza y que acaso pudiera servir de manera no oficial. Su misión podría consistir en lo siguiente:

a) estar en relación con los departamentos gubernamentales, mantenerlos informados de los desarrollos que se produzcan y presentar recomendaciones para acciones del Gobierno, prestando atención particular al problema de asegurar el suministro de uranio para los Estados Unidos;

b) acelerar el trabajo experimental que se está desarrollando actualmente dentro de los límites de los presupuestos de los laboratorios universitarios, proporcionando fondos, en el caso de que fuesen necesarios, a través de sus contactos con personas que deseen hacer contribuciones a esta causa, y acaso también obteniendo la cooperación de laboratorios industriales que dispongan de los equipos necesarios.

Entiendo que Alemania ha detenido en la actualidad la venta del uranio de las minas checoslovacas de las que ha tomado control. El que haya adoptado esta acción tan pronto puede, acaso, ser entendida en base a que el hijo del Subsecretario de Estado alemán, Von Weizsacker, está asociado al Instituto Káiser Guillermo de Berlín, donde se están repitiendo algunos de los trabajos americanos sobre el uranio”.

La carta de Einstein, que Sachs sólo pudo hacer llegar a Roosevelt en octubre, unida a los sentimientos que había suscitado la fisión en Estados Unidos, así como al desarrollo de la física atómica y nuclear en esa nación, dieron algún fruto. En octubre de 1939 se formaba un Comité (del Uranio) nombrado por el presidente, y encabezado por el director del National Bureau of Standards, Lyman J. Briggs, para coordinar la investigación dirigida a conseguir la separación de los isótopos de uranio y una reacción en cadena sostenida. Wigner y Teller, junto

a representantes del Ejército de Tierra y de la Marina, y Richard Roberts, de la Carnegie Institution, formaron parte del Comité. El 1 de noviembre, el Comité informaba al presidente que la reacción en cadena era una posibilidad, pero que no estaba demostrada, y que a pesar de las incertidumbres existentes, el Gobierno debería apoyar una investigación detallada, adquiriendo inmediatamente 4 toneladas de grafito puro (uno de los moderadores posibles, una sustancia que controla la proliferación de neutrones), así como 50 toneladas de óxido de uranio, para el caso de que las investigaciones preliminares justificasen continuar con el proyecto. El presidente se dio por enterado, pero no se produjo acción alguna.

Una vez más, Szilard tomó la iniciativa redactando un artículo para *Physical Review*, la principal revista de física de Estados Unidos, leída además en todo el mundo, en el que describía cómo podía tener lugar una reacción en cadena con uranio, empleando como moderador grafito (no obstante, junto al artículo envió al editor de la revista una carta en la que le pedía que lo retuviese sin publicar hasta nueva orden). Szilard solicitó de nuevo ayuda a Einstein, quien el 7 de marzo de 1940 escribió a Sachs informándole del artículo, así como de que si no se hacía algo éste se publicaría. El mediador se dirigió a su vez al presidente el día 15. Roosevelt contestó que lo mejor sería que el Comité volviese a reunirse. Sachs entonces pidió a Briggs que convocase al Comité; éste respondió afirmativamente requiriendo también la presencia de Sachs, quien preguntó por qué no se invitaba también a Szilard y Fermi. La respuesta de Briggs es sorprendente, pero interesante, en cuanto que revela algunos de los sentimientos de “hostilidad” hacia los emigrantes a los que me referí en el capítulo anterior: “Bien, ya sabe usted, estos temas son secretos y no creemos que ellos deberían ser incluidos”. El asunto terminó, no obstante, arreglándose y tanto Szilard como Fermi asistieron a la reunión.

Aunque a partir de entonces se produjeron algunos avances – en julio de 1940, por ejemplo, los departamentos de Guerra y de la Armada aprobaron un programa encaminado a separar los dos isótopos del uranio –, el progreso fue pequeño. El objetivo principal era la construcción de un reactor capaz de sostener una reacción en cadena y encontrar un método para separar el isótopo U-235 del U-238 y así conseguir el suficiente uranio fisionable. Al fin y al cabo no había demasiados motivos para entrar en una carrera frenética. Todo un océano separaba a los norteamericanos de la guerra europea.

El Proyecto Manhattan

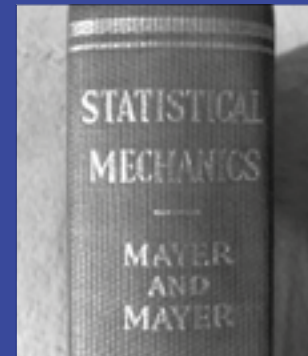
Los primeros pasos realmente significativos para el establecimiento de un programa destinado a fabricar bombas atómicas tuvieron lugar dentro del organigrama de una nueva agencia que el presidente Roosevelt estableció el 28 de junio de 1941, la Office of Scientific Research and Development (Oficina de Investigación y Desarrollo Científico; OSRD), a la que se dio autoridad sobre todos los trabajos



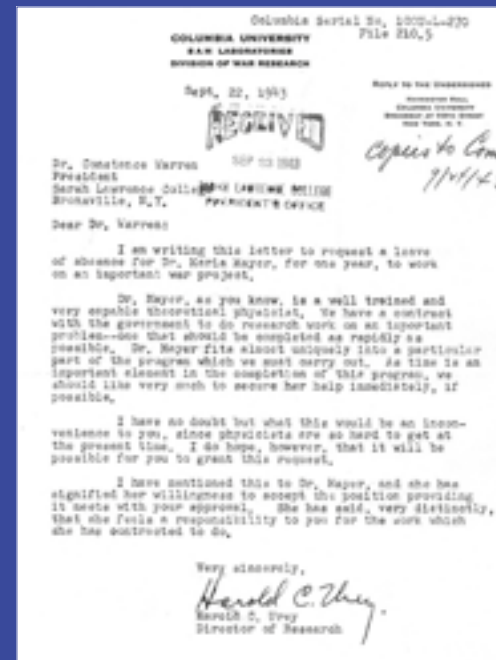
Marianne, la primera hija del matrimonio Mayer, nacida en 1933



Edward Teller, María Goeppert Mayer, Joseph Mayer y James Franck



Lomo de *Statistical Mechanics*, obra de Joseph y María, publicada en 1940



Carta de Harold Urey solicitando que María Goeppert Mayer fuese relevada de sus deberes en el Sarah Lawrence College para colaborar en el Proyecto Manhattan.



Harold Urey



María Goeppert Mayer (segunda por la derecha) con compañeros del Sarah Lawrence College, en 1943

Los primeros pasos realmente significativos para el establecimiento de un programa destinado a fabricar bombas atómicas tuvieron lugar dentro del organigrama de una nueva agencia que el presidente Roosevelt estableció el 28 de junio de 1941, la Office of Scientific Research and Development (Oficina de Investigación y Desarrollo Científico; OSRD), a la que se dio autoridad sobre todos los trabajos científicos de defensa.

científicos de defensa, y a cuya cabeza se puso a Vannevar Bush, un ingeniero conocido por sus contribuciones a la matemática aplicada y a la ingeniería eléctrica. Durante la Primera Guerra Mundial, Bush había trabajado en la detección de submarinos; en 1939 había dimitido de la vicepresidencia del Instituto Tecnológico de Massachusetts para convertirse en presidente de la Carnegie Institution de Washington. Pronto pasó de ser un mero miembro del National Advisory Committee for Aeronautics (Comité Asesor Nacional para Aeronáutica; NACA) a dirigirlo, y al ver los efectos de la guerra que se estaba desencadenando en Europa elaboró planes para un comité que se ocupara de coordinar los esfuerzos nacionales en investigación científica aplicada a la guerra. A principios de junio de 1940, cuando el ejército alemán se adentraba en Francia, Bush persuadió a Roosevelt para que le pusiera al frente de un Comité Nacional para la Investigación en Defensa (NDRC) que fue creado oficialmente el 27 de junio de ese mismo año, diez días después de la caída de Francia; entre sus fines figuraba el de buscar nuevas formas de aplicar la ciencia a las necesidades de la guerra, pudiendo solicitar la ayuda de la National Academy of Sciences, del National Bureau of Standards y de otros laboratorios federales.

La creación un año después (y aproximadamente medio año antes de que Estados Unidos entrara en la guerra) de la OSRD significaba que la NDRC veía recortada sus competencias, puesto que pasaba a depender de aquélla. Como sucesor de Bush en la dirección se nombró a James B. Conant, el químico presidente de Harvard. Medio año más tarde, el 6 de diciembre de 1941 (esto es, un día antes del ataque japonés a Pearl Harbor), se decidió reorganizar el Comité del Uranio (conocido como S-1). Conant pasó a dirigirlo, formando parte de él Lyman Briggs, director del National Bureau of Standards, Eger Murphree, director de investigación de la Standard Oil Development Company, Ernest Lawrence, Arthur H. Compton y Harold Urey, quien fue encargado de dirigir los trabajos para la separación de los isótopos, empleando el método de difusión gaseosa, así

como de la producción de agua pesada. Lawrence se dedicó a la producción inicial de pequeñas muestras de elementos fisiónables, del método electromagnético de separación de isótopos y de ciertos trabajos experimentales relacionados con las propiedades del núcleo de plutonio, y Compton de dirigir los estudios físicos básicos de la reacción en cadena, siendo además autorizado a explorar la posibilidad de producir plutonio en cantidades útiles utilizando reacciones en cadena controladas. En enero de 1942, Compton reorganizó las investigaciones en curso en Chicago bajo el nombre (destinado, obviamente, a confundir) de “Laboratorio Metalúrgico”, contratando a más personal. También supervisó los trabajos de otros laboratorios, incluyendo los de la pila de grafito y neutrones lentos de Fermi en la Universidad de Columbia, en Nueva York, que meses más tarde se trasladó a Chicago (donde se concentraron estos trabajos); y las investigaciones de reacciones con neutrones rápidos para su posible aplicación a explosivos que, bajo la dirección de Gregory Breit, se estaban llevando a cabo en diversos lugares. De manera que fue en Chicago, el 2 de diciembre de 1942, en la denominada *Chicago Pile One*, cuya construcción se había iniciado el 16 de noviembre, cuando el equipo dirigido por Fermi logró la primera reacción en cadena controlada y autosuficiente (producía suficiente energía como para mantenerse operativa) de la historia. Se la dejó funcionar cuatro minutos y medio.

Medio año antes, el 18 de junio de 1942, el coronel del Cuerpo de Ingenieros James C. Marshall, recibió órdenes para que formase una nueva dependencia en su Cuerpo destinada a proseguir un trabajo especial (la fabricación de bombas atómicas). La dependencia fue creada oficialmente el 13 de agosto bajo el nombre *Manhattan Engineer District*, ya que Marshall había instalado su cuartel general en Manhattan (Nueva York). Por razones de seguridad, el trabajo del que se ocupaba se denominó “Proyecto DSM” (*Development of Substitute Materials*). Se trataba de lo que con el tiempo se vendría a conocer simplemente como “Proyecto Manhattan”, a cuyo frente se puso el 17 de septiembre a un oficial extremadamente capacitado del Cuerpo de Ingenieros, el entonces coronel (más tarde general) Leslie R. Groves, cuyo nombre quedaría unido permanentemente al proyecto atómico norteamericano.

La historia de este proyecto me llevaría demasiado lejos y, además, es, aunque sea de manera rudimentaria, bastante conocida. Me limitaré, por consiguiente, a mencionar unos pocos puntos de especial interés y que, en cierta medida, afectaron a la situación de María Goeppert.

En primer lugar es importante señalar que con la asignación del Proyecto DSM al Cuerpo de Ingenieros del Ejército estadounidense se estaba dando un paso, cuyas consecuencias – no apreciadas realmente en aquel momento – marcarían el desarrollo de la ciencia de la posguerra y, más indirectamente, la historia sociopolítica mundial de la década de 1950 en adelante. Expresado brevemente: la sociedad civil estaba cediendo la soberanía – parte de ella al menos – de la ciencia

a las Fuerzas Armadas. Es cierto que en principio tal cesión se suponía temporal, mientras las condiciones excepcionales de la contienda se mantuviesen, pero a la postre los militares percibieron con claridad que la ciencia (especialmente las ciencias físicas, y dentro de ellas la electrónica) de mediados de siglo contenía unas potencialidades y realidades que la hacían imprescindible para el desarrollo de su misión: estar preparados en las mejores condiciones posibles para la guerra. Una guerra, además, que caso de tener lugar probablemente se desarrollaría en o partiría de (caso de ataques soviéticos con misiles de cabezas nucleares) escenarios lo suficientemente alejados del territorio nacional de Estados Unidos como para que fuese necesario poseer los medios electrónicos adecuados para salvar semejantes distancias. En consecuencia, aquella cesión terminó siendo más permanente de lo que se había supuesto. En este sentido, el Proyecto Manhattan significó un momento crucial en la historia de la ciencia contemporánea y, por consiguiente, también en la propia historia general.

Según avanzaban los trabajos, iba quedando clara la envergadura del proyecto. No se necesitaba sólo capacidad científica, sino también industrial y tecnológica, además de la cobertura militar que suministraba una organización e infraestructura esenciales. Estaba el Laboratorio Metalúrgico de Chicago, en cuyo reactor, que contenía casi 400 toneladas de grafito, 6 toneladas de uranio metálico y 58 toneladas de óxido de uranio y que Fermi supervisaba. También el Radiation Laboratory de Ernest Lawrence en Berkeley. Por otra parte, la Westinghouse Electric and Manufacturing Co. se ocupaba de la producción de uranio metálico, y la Mellinckrodt Chemical Works de St. Louis, ayudada por el National Bureau of Standards, de preparar óxido de uranio. De la producción de grafito de gran pureza se encargaban la National Carbon Co. y la Speer Carbon Co., siguiendo las sugerencias de los técnicos del National Bureau of Standards. En los estudios de reacciones con neutrones rápidos dirigidos por Gregory Breit participaron investigadores del Instituto Carnegie de Washington, National Bureau of Standards, Rice Institute, y de las universidades de Cornell, Purdue, Chicago, Minnesota, Wisconsin, California, Stanford e Indiana. Y en otras tareas participan científicos de las universidades de, por ejemplo, Virginia, Brown y Yale, y centros como el Instituto de Investigación Médica Rockefeller y el Iowa State College. La compañía M. W. Kellogg se ocupó de estudiar el proceso de difusión gaseosa de los isótopos 235 y 238 del uranio para poder diseñar una planta piloto.

El problema de separar los isótopos 235 y 238 del uranio era fundamental, pues solo el 235 era fisionable. Un buen resumen de los métodos que se emplearon para lograr tal separación se encuentra en el texto de cinco conferencias que uno de los miembros del Laboratorio de Los Álamos, Robert Serber, un teórico de Berkeley protegido por Oppenheimer, preparó para que los miembros del Laboratorio, así como los que iban llegando a él, tuviesen una visión general de la situación y problemas. Ese texto, considerado dentro de la categoría *Top Secret Limited Document*, no fue desclasificado hasta 1965 pero solo se publicó en 1992,

con notas y comentarios añadidos por su propio autor: Robert Serber, *The Los Alamos Primer*. De uno de esos comentarios extraigo los siguientes pasajes:

“Para preparar una bomba atómica con uranio Estados Unidos tenía que separar la 1/140-ava parte de U^{235} de 139 partes de U^{238} en uranio natural cuando las únicas diferencias entre los dos para separarlos era sus masas. La mayor parte de los 2.000 millones de dólares se gastaron en el programa – el Proyecto Manhattan – en tiempo de guerra, para desarrollar la bomba se invirtió en construir la vasta maquinaria necesaria para separar uranio. Un sistema, la difusión gaseosa [ideado por Gustav Hertz, quien había recibido el premio Nobel de Física en 1925 por desarrollar procesos de separación de isótopos mediante difusión gaseosa], convertía el uranio natural en un gas [...]. La construcción que albergaba la planta de difusión gaseosa en Oak Ridge, Tennessee, correspondía en tamaño: una estructura en forma de U en la que cada brazo tenía casi media milla [800 metros] de largo. Otro sistema, la separación electromagnética, se basaba en el hecho de que un átomo cargado eléctricamente [esto es, un ion] que viaja a través del campo producido por un imán se mueve en un círculo cuyo radio está determinado por su masa. Iones de un compuesto de uranio vaporizado proyectados a través de un campo magnético intenso dentro de un tanque curvado en el que se ha hecho el vacío separan dos haces, con los átomos del más ligero U^{235} siguiendo uno más pequeño que el del más pesado U^{238} . Recipientes metálicos colocados al final de miles de tanques construidos en Oak Ridge recogían cada haz de isótopos en la forma de copos metálicos. El sistema era notablemente ineficiente, pero realizó el trabajo. La mayor parte del uranio utilizado en la bomba de Hiroshima se separó de esta manera”.

Serber no mencionaba un tercer método de separación, el que basaba en la fuerza centrífuga que hace que cuerpos con masas diferentes se separen en una máquina cilíndrica que gira, o centrifugadora. En 1934 Jesse Beams, de la Universidad de Virginia, había utilizado este método para separar los isótopos 35 y 37 del cloro. En 1940 el mismo Beams recibió financiación del gobierno para intentar aplicar el procedimiento a los isótopos de uranio utilizando grupos de centrifugadoras que girasen a gran velocidad, pero el método no tuvo éxito – se necesitaba una cantidad enorme de energía – y terminó abandonándose en 1944.

Para desarrollar métodos de producción de plutonio (elemento, también fisionable, del que estaba formada la bomba de Nagasaki, y que fue necesario “fabricar puesto que su vida media, mucho más reducida que la del uranio, hace que haya desaparecido prácticamente de la Tierra) se construyó, con la participación de la Stone and Webster Engineering Corporation y de Du Pont, una planta en Oak Ridge, Tennessee, conocida como Clinton Engineering Works. Empezó a funcionar el 4 de noviembre de 1943. Y para la producción a gran escala del plutonio se edificó otra sobre el río Columbia, en Hanford, en la parte central del estado de Washington, conocida como Hanford Engineer Works. También hubo

que investigar sobre problemas de corrosión, refrigeración, blindaje, protección, o las consecuencias biomédicas, cuestiones estas en las que participaron numerosas empresas y universidades.

Por último, estaba Los Álamos, el lugar en donde se abordó el problema de utilizar todos los materiales, dispositivos y conocimientos obtenidos en centros como los que acabo de señalar, para fabricar realmente la bomba atómica, la meta final de aquellos trabajos preliminares.

En el verano de 1942, Oppenheimer organizó un encuentro en Berkeley para explorar los aspectos teóricos de las explosiones nucleares; entre los participantes se encontraban Hans Bethe, John van Vleck, Edward Teller, Robert Serber y Felix Bloch. En noviembre se eligió un lugar, Los Álamos, en Nuevo México, a unos 48 kilómetros de Santa Fe, para instalar allí el laboratorio de la bomba atómica. La mayor ventaja de este lugar, al que sólo se podía llegar a través de un tortuoso camino, era el disponer de una extensión de territorio considerable para posibles pruebas. El laboratorio se adjudicó a la Universidad de California y Oppenheimer fue el director desde el comienzo. Oppenheimer llegó a Los Álamos en marzo de 1943 y a continuación lo hicieron los diversos grupos, formando el conjunto de científicos trabajando en colaboración más impresionante de toda la historia de la ciencia anterior. Entre los que estaban o pasaban por Los Álamos se encontraban Von Neumann, Bohr, Richard Feynman, Bethe, Fermi, Teller, Emilio Segré, Weisskopf, Luis Alvarez, Edwin McMillan, Rabi, Tolman, Lawrence, Compton, Edward Condon, Norman Ramsey o Stanislaw Ulam.

Finalmente, después de todos esos trabajos, repartidos en diferentes centros, el 16 de julio de 1945 tuvo lugar la primera prueba de una explosión nuclear, a la que denominaron “Triniy”. En las primeras horas de la mañana, en las desiertas tierras de Jornada del Muerto – a 97 kilómetros de Alamogordo, en Nuevo México, y a 400 del Laboratorio de Los Álamos – se hizo estallar una bomba de plutonio, el elemento químico que ocupa el número 93 en la tabla periódica que, como dije, hubo que recrear en el laboratorio dada casi inexistencia en la Tierra. Las bombas que se lanzaron sobre las ciudades japonesas de Hiroshima y Nagasaki el 6 y 9 de agosto de 1945, respectivamente, fueron de uranio y de plutonio, pero no se consideró necesario probar antes la de uranio, sí la de plutonio pues utilizaba un nuevo tipo de espoleta para desencadenar la reacción explosiva. El resultado de esa prueba forma parte de la historia: siete minutos después de la explosión la nube producida alcanzaba once kilómetros y medio de altura. El resto, como se suele decir, es efectivamente historia.

Y en el Proyecto Manhattan, aunque de forma muy modesta, participó María Goeppert Mayer.

Las preocupaciones de los Fermi y los Mayer

Antes de que María se involucrase en investigaciones relacionadas con la guerra, lo que suponía que Estados Unidos hubiese entrado en ella –algo que sucedió tras el ataque japonés a Pearl Harbor en diciembre de 1941– tanto ella como los Fermi eran muy conscientes del peligro que significaba la Alemania de Hitler, por entonces ya en plena avalancha de conquistas. María porque estaba bien informada de lo que sucedía en Alemania a través de su familia, y los Fermi, no se olvide, habían abandonado Italia para evitar que Laura, de origen judío, pudiera ser perseguida en la fascista, y aliada de Alemania, Italia de Mussolini. En su libro *Atoms in the Family*, Laura Fermi incluyó unos pasajes que ilustran la inquietud que sentían las familias Fermi y Mayer ante los posibles acontecimientos futuros. Con la lejanía del tiempo, parecerá incluso infantil la idea que se les ocurrió a personas tan capaces intelectualmente, pero, ante el peligro, las reacciones de los humanos escapan a los criterios normales de racionalidad. Esto es lo que escribió Laura Fermi:

“Nuestros amigos los Mayer estaban tan preocupados como nosotros. Los habíamos conocido en Ann Arbor en 1930, cuando habíamos visitado América por primera vez. Acababan de casarse; Joe un chico americano, alto, rubio; María una chica de tamaño medio, rubia, procedente de Gotinga, donde se habían casado. Ambos eran científicos, él químico, ella física. Debido a que Joe se había unido a la facultad de la Universidad de Columbia en el otoño de 1939, habían comprado una casa en Leonia y trasladado allí casi al mismo tiempo que nosotros.

María, que todavía tenía muchos familiares en Alemania, estaba muy informada de lo que pasaba allí y sabía lo que significaba el nazismo. Los Mayer y los Fermi decidieron abandonar Estados Unidos juntos si el nazismo se estableciera en este país. Durante las muchas tardes que pasamos con los Mayer, entre la caída de Francia y la entrada de América en la guerra, hicimos planes juntos. Entre el argumento filológico sobre el origen de alguna palabra inglesa y consejos acerca de jardinería que los Mayer pasaban a los Fermi, nos preparábamos para convertirnos en Robinsones Crusóes modernos en alguna isla desierta alejada.

Hicimos planes, tan razonablemente concebidos en teoría como cuidadosamente desarrollados en todos los detalles, tal como se podría esperar de un grupo que incluía dos físicos teóricos y un químico práctico, natural de América.

Joe Mayer iba a ser nuestro capitán, un papel para el que no tenía demasiada experiencia. El conocimiento de Enrico sobre las corrientes, mareas y estrellas ayudaría. El placer que sentía ante la perspectiva de experimentar con brújulas y sextantes era esperanzador. No obstante, Joe pensaba que deberíamos practicar la navegación en las aguas de Florida a la primera oportunidad que se presentase.

Mientras tanto, había mucho que podríamos hacer. María Mayer y Enrico deberían informarse de qué parte de nuestra civilización merecía la pena salvar. Para ello, María debería reunir los libros más adecuados. Enrico, el descendiente de granjeros, debería estudiar los problemas agrícolas de nuestro refugio. Mi tarea era preocuparme de que nuestra colonia no se quedase desnuda en los años futuros. Tenía que decidir sobre semillas de algodón y ruecas de hilar, o sobre rollos de tela. Daba lo mismo mientras todos estuvieran vestidos. Algunas personas de ciencia serían invitadas a unirse a nuestra expedición: debíamos contar con un doctor; tenía que haber niños de edad, sexo y herencia que pudieran más tarde casarse con los nuestros y poblar la isla.

Qué isla deberíamos hacer nuestra era algo todavía por determinar. En una guerra en la que con toda probabilidad participaría Estados Unidos en el bando contra Alemania, el Océano Atlántico estaba fuera de lugar. El Océano Pacífico estaba lleno de islas. En la zona de clima templado, entre las islas hawaianas y las filipinas, existían numerosos islotes lo suficientemente grandes para nosotros. Teníamos que buscar una isla desierta entre ellos.

¡No podíamos imaginar Pearl Harbor, y no consideramos a los japoneses!

Mientras imaginábamos esta aventura, Enrico y yo no despreciamos más precauciones prácticas. Conocimiento histórico y experiencia personal nos habían enseñado que cuando estalla la guerra en un país, las propiedades de los extranjeros enemigos quedan congeladas inmediatamente. No podíamos prever el grado de tolerancia americana; no sabíamos cuánto margen de acción dejarían las restricciones financieras para poder vivir confortablemente. De manera que decidimos enterrar un ‘tesoro’ en nuestro sótano [...].

El ‘tesoro’ resultó innecesario. Lo desenterramos solamente cuando nos marchamos de Leonia”.

La reacción de los Fermi y los Mayer me recuerda algo que se le ocurrió a Erwin Schrödinger, y que propuso en una carta escrita el 24 de febrero de 1939 desde Grand Hotel de Bruxelles al físico español Blas Cabrera. (Schrödinger había abandonado la cátedra que ocupaba en la Universidad de Graz después de que Alemania se anexionara Austria, y estaba buscando un lugar donde establecerse, haciéndolo en septiembre de 1939 en Dublín; Cabrera se había exiliado de España en septiembre de 1936 y se hallaba en París; el castellano de la carta es de Schrödinger):

“Querido amigo: hay muchos meses que no he tenido nuevas inmediatas de V. aunque, estando en Oxford, he entendido que seguía V. viviendo en París en la ciudad universitaria y que no se había cambiado mucho hasta entonces.

Ahora mismo me enteran los periódicos que V. ha encontrado la misma suerte (puede llamarse aun *dicha!*) que a mi me había sucedido en los primeros días de setiembre.



Max Planck tomando la palabra en el 25 aniversario de la creación de la Kaiser-Wilhelm Gesellschaft (1936)



El grupo de Enrico Fermi en Roma (junio de 1934). De izquierda a derecha: O. D'Agostino, E. Segrè, E. Amaldi, F. Rasetti y E. Fermi

Imágenes de las bombas usadas en Hiroshima y Nagasaki en una publicación de la época



R. Oppenheimer, E. Fermi y E. O. Lawrence en Berkeley, 1936

Albert Einstein y Leo Szilard, tratando de la carta a Roosevelt



Portadas de la revista *Time* dedicadas a Albert Einstein (1946) y J. Robert Oppenheimer (1954)

¡He un nuevo suceso mucho más grave para V. y su señora que para nosotros! Me duele muchísimamente. Claro estaba que no podía acontecer otro, ni en su caso ni en el mío, dado el éxito lamentable de las situaciones políticas. Hemos perdido cada uno su patria. ¡Y mucho más! Quiero decir que yo he perdido la suya también. Y esto me pesa otra vez tanto. Hemos perdido la Italia. Hemos perdido quasi todos las partes de Europa dignas de habitarse.

¿Que harán Vs.? Yo, por el momento, tengo una posición por seis meses, posición muy bien pagada. Después tengo – muy probablemente – la posibilidad de [trabajo?] una [cátedra?] en el extremo norte del continente, o, para decir mejor, en una de sus islas. Aunque la gente de allá me trate con mucha amistad, me parece una decisión lúgubre para un hombre que quiere los montes, que quiere el Sur, que quiere el Mediterráneo. Le imploro no digaselo a nadie porque es muy probable que no obstante tendré que hacerlo. Sin embargo sigo rumiando otras posibilidades. Pienso formalmente en América del Sud, quiero decir en los países donde se habla castellano. He pensado si, añadiendo nuestros dos nombres bien conocidos en el mundo (por lo menos en el mundo de la física), nos ofreciésemos a trasplantar la física europea a un sitio apartado, en Perú, p. e., trayendo con nosotros algunos discípulos, ¿creé V. que se podría obtener condiciones posibles y al fin adquirir una nueva patria? ¿Es eso un sueño vano?

Lo digo a V. para que lo rumie. No conozco su situación de este momento. Es posible que sea muy embarazada. Espero que no lo es por el momento. Mas en todo caso me parece que en los años que van a venir la felicidad posible de la vida sera una funcion d^{+n} de la distancia d de Europa, significánd n un exponente bastante elevado. ¿No lo cree V.?

Le ruego dé mis profundos respetos a su señora y crea que yo me quedo siempre su adictísimo y devotísimo amigo

E. Schrödinger.”

María Goeppert Mayer y el Proyecto Manhattan

El día después del ataque a Pearl Harbor, María Goeppert Mayer recibió la primera oferta de trabajo real desde su llegada a Estados Unidos: un puesto de media jornada en el Sarah Lawrence College de Bronxville (Nueva York), de alumnado exclusivamente femenino, al que, si aceptaba, debería incorporarse inmediatamente. El salario era atractivo, 1.500 dólares anuales por dos días de dedicación. Aceptó, pese a necesitar de un coche para poder ir allí desde su casa. En el College desarrolló un curso sobre ciencia que cubría las diferentes ciencias y que ella misma ideó. Prácticamente al mismo tiempo Joseph Mayer se incorporó al ejército, siendo destinado al Campo de Pruebas de Aberdeen, en Maryland, para investigar sobre armas convencionales, una ocupación que le mantenía alejado de su casa cinco días a la semana (y los sábados los dedicaba a trabajar en Columbia);

El día después del ataque a Pearl Harbor, María Goeppert Mayer recibió la primera oferta de trabajo real desde su llegada a Estados Unidos: un puesto de media jornada en el Sarah Lawrence College de Bronxville (Nueva York), de alumnado exclusivamente femenino, al que, si aceptaba, debería incorporarse inmediatamente. En la primavera de 1942 María recibió una nueva oferta, ésta de su amigo Harold Urey que estaba formando un grupo de trabajo en Columbia para intentar resolver un problema esencial para el Proyecto Manhattan.

y en febrero de 1945 estuvo destinado durante varios meses en el Pacífico, para comprobar cómo utilizaban sus armas los soldados entrenados en Aberdeen. En la primavera de 1942 María recibió una nueva oferta, ésta de su amigo Harold Urey que estaba formando un grupo de trabajo en Columbia para intentar resolver un problema esencial para el Proyecto Manhattan, el de la separación del isótopo fisionable 235 del uranio del 238 (como ya vimos, el Comité S-1 le había encargado a finales de 1941 dirigir los trabajos de separación mediante difusión gaseosa). Los conocimientos químico-físicos de María hacían de ella una buena incorporación al proyecto. Aceptó la oferta con la condición de que fuese un trabajo a tiempo parcial (media jornada), que nunca tendría que trabajar los sábados y que podría quedarse en casa si alguno de sus hijos enfermaba. (Sin embargo, en la práctica el trabajo distó de ser solo de media jornada.) Pidió entonces excedencia en el *Sarah College*, aunque a lo largo de toda la guerra se las apañó para dar allí clases ocasionales. Aun así, la tensión del trabajo y la ausencia de su marido terminó haciendo que se distanciase de sus hijos – para ella la ciencia fue siempre muy importante –, que quedaron al cuidado de una niñera que contrató pero que no fue del agrado de ellos. A partir de entonces las relaciones con sus hijos fueron difíciles, especialmente con su hija Marianne. Su trabajo – al que me referiré enseguida – en el Proyecto Manhattan empeoraría la situación.

Aunque el objetivo central del grupo de Urey era utilizar el método de difusión gaseosa él no estaba seguro de que funcionase, y decidió explorar al mismo tiempo otro método, el de la separación mediante reacciones fotoquímicas. En una de sus conversaciones con Joan Dash, María manifestó que “habitualmente Urey no me asignaba a la línea principal de investigación del laboratorio, sino a aspectos laterales, por ejemplo a la investigación de la posibilidad de separar isótopos

mediante reacciones fotoquímicas. Esto era física agradable, limpia, pero no ayudó en la separación de isótopos”.

El método fotoquímico exigía conocer bien los espectros del U-235 y U-238 y como María había trabajado anteriormente en espectroscopia – recuérdese, por ejemplo, el mencionado artículo que publicó en 1942 con Kenneth McCallum, “Calculations of the absorption spectrum of Wurster’s salts” – Urey le encargó dirigir los trabajos teóricos. Pero pronto sus tareas aumentaron, como se refleja en una carta que escribió posteriormente a Born en la que le decía que había comenzado siendo una asesora teórica en un pequeño proyecto, pero que terminó dirigiendo un grupo experimental formado por quince personas, la mayoría químicos. Empezó reuniendo y comparando los datos publicados sobre los espectros de compuestos de uranio, y encontró que existían muchas lagunas, por lo que encargó a los químicos que las llenasen. Pero este método no condujo a nada y, en 1943, Urey decidió que se abandonase este procedimiento (solo años más, cuando se dispuso del láser, fue factible su utilización).

María pasó entonces a dedicarse al método de la difusión gaseosa, centrándose en investigar las propiedades termodinámicas del hexafluoruro de uranio, UF_6 , el único gas que se mantiene como tal a temperaturas moderadas, el más pesado que se conocía y que, gracias a esto, era en principio adecuado para utilizar en el método de centrifugación. Su trabajo consistió en determinar el rango de temperaturas en las que el gas era estable y en establecer su estructura química exacta, lo que consiguió utilizando medidas de su espectro, datos con los que pudo calcular sus propiedades termodinámicas. El que fuera capaz de predecir el comportamiento del UF_6 a diferentes temperaturas fue importante para que continuase desarrollándose el método de difusión gaseosa.

Durante los años de la guerra no publicó nada, como sucedió con todas las investigaciones que se llevaron a cabo entonces con fines militares, pero los trabajos que desarrolló sin duda fueron relevantes para dos artículos que publicó con posterioridad junto a Jacob Bigeleisen, un químico que también trabajó en Columbia en el proyecto de separación de los isótopos de uranio (después de la guerra, aceptó un puesto en la Universidad del Estado de Ohio y, posteriormente, en la de Chicago, antes de incorporarse en 1948 al Brookhaven National Laboratory) titulado “Calculation of equilibrium constants for isotopic exchange reactions” (*Journal of Chemical Physics*, 1947), y otro con Peter Stevenson y John Turkevich como coautores, “Vibrational spectrum and thermodynamic properties of uranium hexafluoride gas” (*Journal of Chemical Physics*, 1948). En cuanto a los datos sobre los espectros de compuestos de uranio, fueron publicados por la *Atomic Energy Commission* después de la guerra, e incluían un análisis detallado de la fluorescencia, así como los espectros de absorción de los compuestos, con un apéndice de 75 páginas de datos espectroscópicos, la mayoría preparados por Goeppert Mayer.

Durante los años de la guerra no publicó nada, como sucedió con todas las investigaciones que se llevaron a cabo entonces con fines militares, pero los trabajos que desarrolló sin duda fueron relevantes para dos artículos que publicó con posterioridad junto a Jacob Bigeleisen.

El Opacity Project

En el verano de 1941, mientras esperaba que las investigaciones destinadas a fabricar la bomba atómica se pusieran realmente en marcha, Edward Teller se estableció en la Universidad de Columbia, aprovechando para asesorar al grupo de Urey para la separación de isótopos. Esto le permitió profundizar en las relaciones con los Mayer. En sus memorias recordó que “nuestros mejores amigos aquel año eran los Fermi, los Mayer y los Urey. Todos vivían fuera de la ciudad de Nueva York, en Leonia, por consiguiente, y aunque nosotros vivíamos cerca de la universidad, Mici [su esposa] y yo viajamos mucho a Leonia.” Esta relación de amistad, a la que se sumaba el respeto científico, ayudaron a que en 1943 Teller ofreciese a María Goeppert Mayer que se sumara a un proyecto, el *Opacity Project* (Proyecto Opacidad), relacionado con las bombas que se estaban preparando en el Proyecto Manhattan.

Instalado ya en 1943 en el Laboratorio de Los Álamos, a Teller no le gustó que Oppenheimer encargase la dirección de la División de Física Teórica a Hans Bethe, ya que creía que él tenía más méritos y experiencia en lo que se refería a la idea de utilizar la fisión del uranio para fabricar bombas. Empeoró la situación el hecho de que Bethe intentase que Teller se dedicara a unos trabajos que no le gustaban. Para solucionar el problema, Oppenheimer le hizo un encargo diferente, que Teller explicó en sus memorias en los siguientes términos:

“Pocas semanas después [de su choque con Bethe], Oppie [Oppenheimer] me hizo un encargo que me gustó porque implicaba un único privilegio: viajar. Podíamos discutir nuestro trabajo abiertamente dentro de los confines de Los Álamos, pero las medidas de seguridad impedían el intercambio de información entre los laboratorios que trabajaban en aspectos diversos del programa. Debido a que se necesitaba perentoriamente ese intercambio de información en los laboratorios de Hanford, Oak Ridge, Chicago y Columbia, Oppie delegó en cuatro de nosotros el ser portavoces. Yo quedé responsable en gran medida de las comunicaciones con Columbia.

Sospecho que parte de la razón para que yo fuese seleccionado fue que había suscitado repetidamente la cuestión del transporte de energía dentro de la bomba [lo hizo al menos desde 1942]. De mi trabajo con Gamow conocía que

la *opacidad* – la facilidad o dificultad con la que la radiación electromagnética puede transferirse a través de un material – desempeña un papel importante en determinar el tiempo necesario para que la energía emitida en el centro del Sol llegue a un punto de la superficie del Sol.

Dadas las temperaturas en la bomba, creía que la transferencia de energía – en este caso, por medio de rayos X – podía desempeñar un papel importante en la eficacia de la bomba. Cuando la opacidad es baja, la radiación escapa rápidamente. Esto significaba que la bomba produciría menos energía, ya que la presión que se produce durante una explosión sería menor. Una bomba en la que se necesitara más tiempo para producir la energía sería más eficiente; por consiguiente, un escape fácil de la radiación, o utilizando el término técnico, una *baja opacidad*, podía tener efectos importantes en la bomba atómica. Estimaciones superficiales sugerían que la pérdida de energía debida a la radiación no desempeñaría un gran papel. Aunque Oppie estuvo de acuerdo en que se necesitaban mejores estimaciones, nadie en Los Álamos tenía tiempo para realizar los cálculos que demostrasen o refutasen la cuestión.”

Y como Teller estaba encargado de supervisar los trabajos que se hacían en Columbia, pensó que un magnífico candidato para participar en ese proyecto era su amiga María Goeppert Mayer, con sus sólidos conocimientos de mecánica cuántica:

“Incluso aunque María no había dejado Alemania porque estuviera en peligro (solamente su abuela y bisabuela eran judías), odiaba el nazismo. Yo creía que estaría encantada de poder contribuir al esfuerzo de la guerra [en realidad ya lo estaba haciendo trabajando en la separación de isótopos] y así se lo dije a Oppie. En noviembre de 1943 Oppie me hizo intermediario para proponerle la tarea y, si aceptaba, de supervisar esa tarea.”

La naturaleza de aquel trabajo exigía que María recibiese las pertinentes autorizaciones. Oppenheimer dio su visto bueno, pero no era él quien debía dar el permiso oficial. Para ello, Goeppert Mayer y Teller viajaron a Washington D. C. donde obtuvo la autorización. En la primavera de 1945, María fue invitada a pasar varios meses en Los Álamos para que pudiera tener una visión más completa del proyecto y trabajar estrechamente con Teller. De nuevo en sus memorias, Teller se refirió a esa estancia:

“Viendo Los Álamos a través de los ojos de María me di cuenta del lugar maravilloso y sorprendente que era, y también profundicé en la idea que tenía de los talentos de Oppenheimer como administrador. Pocas semanas después de que María llegase, supo que con el final de la campaña en Okinawa, Joe [Mayer] iba a regresar a casa. Stanley Frankel y yo llevamos a María a los cañones de Alburquerque. Ella había decidido utilizar la extravagante pero rápida aventura de regresar a su casa en avión; entonces, hace más de medio siglo, ni Santa Fe ni Los Álamos tenían aeropuerto.”

Y así María entró en un dominio, el de las propiedades de la materia y la radiación a temperaturas extremadamente elevadas, que de hecho tenía también mucho que ver con otra empresa científica a la que Teller dedicaría grandes esfuerzos: la fabricación de una bomba de hidrógeno. Al mismo tiempo, reforzaba sus relaciones con Teller, que condujeron más tarde a otras colaboraciones, como veremos en el próximo capítulo. Aunque no podía sospecharlo, el camino de investigación que tomó entonces terminaría conduciéndola a su gran éxito científico, uno que le valió un Premio Nobel.

El camino hacia el Nobel

Lecciones de la guerra

Pocos días después de que las bombas atómicas destruyeran Hiroshima y Nagasaki, y con ellas llegase el final de la Segunda Guerra Mundial, tres representantes de la Universidad de Chicago viajaron a Santa Fe, la localidad cercana al Laboratorio de Los Álamos. Allí trataron con Fermi y algún científico más los planes que la universidad tenía de crear un instituto dedicado a investigar en temas nucleares, en el que participaran, además de físicos, químicos, biólogos e ingenieros. En realidad se trataba de continuar por una senda que ya estaba desbrozada, en tanto que en Chicago se habían desarrollado importantes trabajos relacionados con la bomba atómica.

La iniciativa que estaba tomando la Universidad de Chicago se enmarcaba en un contexto más amplio, el de la importancia que la investigación científica – especial pero no únicamente en lo concerniente a la física y, dentro de ella, la física nuclear – adquirió una vez finalizada la guerra. Los militares, y a través de ellos también los políticos, entendieron bien las ventajas que la ciencia había aportado a la nación a la hora de conseguir la victoria, y se dieron cuenta de que los esfuerzos que se realizaron durante la contienda debían continuarse. Existen muchos ejemplos que muestran el interés que la investigación científica despertó en los militares y el gobierno federal. Veamos dos de ellos.

El primer ejemplo que he seleccionado involucra al ingeniero húngaro Theodore von Kármán, uno de los expertos en física de fluidos y aerodinámica más destacados de todo el siglo xx, quien a comienzos de la década de 1930 había dejado el instituto que dirigía en Alemania por el California Institute of Technology, donde

La iniciativa que estaba tomando la Universidad de Chicago se enmarcaba en un contexto más amplio, el de la importancia que la investigación científica – especial pero no únicamente en lo concerniente a la física y, dentro de ella, la física nuclear – adquirió una vez finalizada la guerra.

dirigió la Escuela Graduada de Aeronáutica Daniel Guggenheim, desde la que se convirtió en la máxima autoridad de Estados Unidos en ese campo.

Al ser un científico aplicado eminente en una especialidad como la aeronáutica (que demostró ser crucial durante la guerra), las Fuerzas Armadas le hicieron numerosos requerimientos, que él aceptaba habitualmente, incluso mucho antes de que comenzase la Segunda Guerra Mundial. Por consiguiente no es extraño que Henry Harley Arnold – comandante general de las Fuerzas Aéreas, y el principal defensor de que Estados Unidos contase con una fuerza aérea de igual rango que el ejército de Tierra y la Armada – tuviese contactos frecuentes con el Instituto Tecnológico de California, que albergaba uno de los principales centros de formación aeronáutica de la nación.

Uno de los retos que Arnold debía afrontar como jefe de las Fuerzas Aéreas era, según manifestó en su autobiografía, *Global Mission* (1949), “obtener los mejores cerebros disponibles, y hacerles que considerasen los últimos desarrollos en las Fuerzas Aéreas de los alemanes y los japoneses, así como de la RAF, y que determinasen los pasos que debería dar Estados Unidos para tener la mejor Fuerza Aérea del mundo dentro de veinte años”. En particular, Arnold deseaba encontrar a alguien capaz de encabezar un comité de científicos – “científicos prácticos”, decía – e ingenieros que tuviesen experiencia en “sónica, electrónica, radar, aerodinámica y cualquier otra rama de la ciencia que pueda influir de alguna manera en el desarrollo de la aviación del futuro”. Robert Millikan, que había llevado a Von Kármán a Caltech, le recomendó a éste y el general aceptó la indicación.

La relación entre Arnold y Von Kármán comenzó en 1944, cuando el final de la Segunda Guerra Mundial estaba cercano, aunque ambos ya se conocían desde 1936. No pasó mucho tiempo antes de que Von Kármán llegara a Washington y, poco después, uno por uno, comenzasen a llegar nuevos científicos. “Les dije a estos científicos”, continuó Arnold en su autobiografía, “que quería que pensasen a veinte años vista. Tenían que olvidar el pasado; considerar los equipos disponibles en la actualidad solamente como la base para las predicciones más atrevidas. Quería que pensasen sobre aviones con velocidad supersónica, aeroplanos que se moviesen y operasen sin tripulaciones; mejora en bombas, de manera que pudiéramos utilizar bombas más pequeñas para obtener efectos más grandes; defensas contra la aviación moderna y contra la que estaba por venir; sistemas de comunica-

ción entre aeroplanos y tierra, y entre los propios aeroplanos en el aire; televisión, tiempo meteorológico, investigación médica; energía atómica, y cualquier otro apartado de la aviación que pudiese afectar al desarrollo y utilización del poder aéreo en el futuro”.

Von Kármán pasó a depender directamente de Arnold, quien concretaba sus deseos el 7 de noviembre del mismo 1944, cuando envió a aquel un informe que merece ser reproducido en tanto que sirve para explicar el talante que animaría en el futuro a las fuerzas aéreas de Estados Unidos, y a través suyo a una gran parte de la política científica de las naciones más desarrolladas. Aunque la Fuerza Aérea estadounidense no representa el total de las Fuerzas Armadas de esta nación, sin embargo fue, en razón de su potencial y dependencia de la técnica, probablemente el cuerpo militar más influyente en la posguerra a la hora de diseñar o establecer, por un lado, las tácticas de defensa y ataque y, por otro, la política federal de investigación y desarrollo (una copia del memorándum, al igual que de la respuesta e informes de von Kármán, que utilizaré más adelante, se encuentran localizados en la caja 175.4 de la *Th. von Kármán Collection*, depositada en la Robert A. Millikan Library, California Institute of Technology Archives):

“MEMORÁNDUM PARA EL DR. VON KÁRMÁN:

Tema: Programa de desarrollo de largo alcance para las AAF [*Army Air Forces*].

1. Creo que la seguridad de los Estados Unidos de América continuará reposando en parte en desarrollos instituidos por nuestros científicos universitarios y profesionales. Deseo que los programas de investigación y desarrollo posbélicos para la siguiente guerra de las Fuerzas Aéreas se pongan en una base razonable y sean estables. Además, quiero que estos programas contengan ideas bien pensadas, que miren hacia el futuro y que, además de garantizar la seguridad de nuestra nación y servir de guía para los próximos diez o veinte años, se puedan utilizar como base para solicitar al Congreso provisiones de fondos adecuadas.

2. Para ayudarle a que usted y sus asociados comprendan nuestras ideas actuales acerca de lo que es o debe ser la guerra, pasaré revista a nuestros principios. El objeto de la guerra total es destruir la voluntad de resistir del enemigo, lo que nos permitirá imponer en él nuestra voluntad. El logro de los objetivos de la guerra se puede dividir en tres fases: político, estratégico y táctico. La acción política está dirigida contra el poder gobernante del enemigo, la acción estratégica contra sus recursos económicos y la acción táctica contra sus Fuerzas Armadas. Las acciones estratégicas y tácticas son nuestra principal preocupación y se rigen por los principios de objetivo, sorpresa, simplicidad, masa, ofensiva, movimiento, economía de fuerzas, cooperación y seguridad.

3. Creo que es axiomático que:

a. Como nación somos una de las potencias predominantes.

- b. Sin duda tendremos enemigos potenciales que constituirán una amenaza continua para la nación.
- c. Mientras que las guerras más importantes continuarán desarrollándose principalmente entre los paralelos norte 30 y 60, hay que tomar en consideración la posibilidad de una guerra global.
- d. Nuestra investigación y desarrollo prebélico ha sido a menudo inferior al de nuestros enemigos.
- e. Son las armas ofensivas, no las defensivas, las que ganan las guerras. Las contramedidas son de importancia secundaria.
- f. Nuestro país no mantendrá un gran ejército permanente.
- g. Los requisitos de la economía de los tiempos de paz indican que, mientras que las AAF reciben ahora el 43 por ciento de los presupuestos del Departamento de Guerra, esta cantidad o proporción puede no continuar.
- h. Equipo obsoleto, ahora disponible en grandes cantidades, puede ahogar el desarrollo y dar al Congreso una impresión falsa de seguridad.
- i. Mientras que nuestros científicos no tienen necesariamente la cuestionable ventaja de una preparación militar básica, recíprocamente nuestros oficiales de las AAF no tienen que ser por necesidad científicos profesionales.
- j. Armas con visión humana (y acaso con ayuda de radar y televisión) tienen una eficacia y flexibilidad potencial superior a las armas basadas en la mecánica.
- k. Es un principio fundamental de la democracia americana que las pérdidas humanas son odiosas. Continuaremos luchando mecánicamente en lugar de utilizar hombres preferentemente.
- l. Todavía no hemos superado los problemas que representan las grandes distancias, el tiempo atmosférico y la oscuridad.
- m. Son requisitos: explosivos más potentes, velocidad supersónica, mayor eficacia en ofensiva masiva, mayor flexibilidad y control de armas.
- n. La tendencia actual hacia armas de terror como bombas volantes y napalm puede continuar hacia la guerra bacteriológica y de gases.
- 4. No se puede desestimar la posibilidad de guerras importantes. Puede que nosotros, como una nación, no tengamos siempre potencias amigas de primer orden o grandes distancias oceánicas como barreras. Análogamente, supongo que nuestros enemigos pueden disponer pronto de medios de neutralizar plantas de producción aeronáutica. ¿No es posible ahora determinar si un arma totalmente diferente reemplazará al aeroplano? ¿Son una posibilidad los radares de control remoto, o cohetes militares de precisión guiados por televisión, o

buscadores de múltiples usos? ¿Es la propulsión atómica algo a considerar en una guerra futura?

5. Excepto, acaso, para revisar técnicas actuales y corrientes de investigación, lo que le pido a usted y a sus asociados es que dejen de lado la presente guerra e investiguen todas las posibilidades y modos de actuación más aconsejables para desarrollos en la posguerra y guerras futuras, con relación a las AAF. Cuando terminen sus estudios, deme, por favor, un informe o guía para recomendar futuros programas de investigación y desarrollo de las AAF.

¿Puedo pedirle que en su informe final incluya también recomendaciones a las cuestiones siguientes?:

- a. ¿Qué ayuda deberíamos dar o pedir a nuestras organizaciones científicas educativas y comerciales en tiempo de paz?
- b. ¿Se acerca el momento en que todos los científicos y sus organizaciones deban dar una pequeña parte de su tiempo y recursos para evitar el futuro peligro nacional y ganar la próxima guerra?
- c. ¿Cuáles son los mejores métodos de institucionalizar la producción piloto de equipos sin fines comerciales, ni valor fiscal, desarrollados exclusivamente para el periodo de la posguerra?
- d. ¿Qué proporción del dinero disponible debería asignarse a la investigación y desarrollo?”.

Von Kármán se tomó muy en serio la tarea que Arnold le proponía, formando un grupo que fue conocido como *Army Air Force Scientific Advisory Group* (más tarde se transformó en el *U. S. Air Force Scientific Advisory Group*). Poco más de un año después, el 15 de diciembre de 1945, contestaba al general señalándole que en “cooperación con un selecto grupo de asociados, expertos en varias ramas de las ciencias implicadas”, había intentado “revisar los requisitos científicos involucrados en las funciones de las futuras Fuerzas Aéreas”. Los resultados del equipo dirigido por el profesor de Caltech se plasmaron en un informe titulado *Toward New Horizons*, que fue secreto hasta finales de la década de 1950. (En la biblioteca del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial, INTA, en el campus de Torrejón, se encuentra un ejemplar de este documento traducido al español por Antonio Pérez-Marín; se trata de una edición limitada – la que consulté llevaba el número 6 –, en ciclostil, de 166 páginas, publicada en 1959 bajo el encabezamiento “Traducción del Informe del año 1945 al General H. H. Arnold”. “Hacia Nuevos Horizontes”. “Ciencia, llave de la supremacía aérea”, por Teodoro von Kármán). Dividido en trece partes, la primera contiene una discusión algo general sobre la relación entre ciencia y guerra aérea, así como un análisis de los principales problemas de investigación de las Fuerzas Aéreas. Las doce partes siguientes incluyen 32 monografías científicas, de temas tan variados como “Aerodinámica y diseño de aeronaves”, “Direcciones futuras en el diseño y desarrollo de combustibles sólidos

y líquidos para cohetes”, “Materiales resistentes a altas temperaturas”, “Control automático de vuelo”, “Misiles guiados por televisión y calor”, “Ayudas de radar para dirigir misiles”, “Propiedades de explosivos potentes”, “Utilización del radar en las operaciones de las Fuerzas Aéreas”, “Direcciones futuras de investigación en medicina aeronáutica” o “Investigación psicológica en las Fuerzas Aéreas”.

Las tres primeras conclusiones generales del informe preparado por Von Kármán merecen ser citadas:

“1. El descubrimiento de los medios atómicos de destrucción hace que la existencia de unas Fuerzas Aéreas poderosas sea incluso más imperativo que antes [...].

2. Los descubrimientos científicos en aerodinámica, propulsión, electrónica y física nuclear, abren nuevos horizontes para la utilización del poder aéreo.

3. Los próximos diez años deberían ser un periodo de desarrollo sistemático y vigoroso, dedicado a la realización de las potencialidades del progreso científico, con los siguientes fines principales: vuelo supersónico, aviones sin pilotos, vuelo en todo tipo de tiempo meteorológico, navegación y comunicación perfeccionada, control remoto y lucha automatizada, fuerzas de bombardeo, y transporte aéreo de ejércitos completos”.

El propio Von Kármán fue el autor del primer trabajo del informe, titulado *Science, the Key to Air Supremacy* (*Ciencia, la llave para la supremacía aérea*), que concluía haciendo hincapié en que se necesitaba una poderosa Fuerza Aérea, que fuese capaz de:

“a. Alcanzar objetivos remotos con facilidad y que pudiese golpearlos con un gran poder destructivo.

b. Asegurarse la superioridad aérea en cualquier región del globo.

c. Desembarcar, en poco tiempo, fuerzas poderosas, hombres y armas, en cualquier lugar del globo.

d. Defender nuestro propio territorio y bases de la manera más eficaz.”

Y era evidente que “solamente una fuerza aérea que explote completamente el conocimiento y habilidad que la ciencia posee ahora y poseerá en el futuro tendrá la posibilidad de lograr estos fines”.

El informe que von Kármán preparó para el general Arnold constituye una magnífica muestra de la militarización que amenazaba el futuro de la ciencia estadounidense. Una “amenaza” que se cumpliría, al menos en parte. Pero hubo otras tendencias, otras exploraciones de lo que la ciencia podría ofrecer a la sociedad en el futuro, una vez que la guerra terminase. Y aquí aparecen dos nombres: el del presidente Roosevelt y el de Vannevar Bush, director como sabemos de la Oficina de Investigación y Desarrollo Científico. El 17 de noviembre de 1944, Roosevelt envió a Bush la siguiente carta, que se reprodujo en el informe publicado:



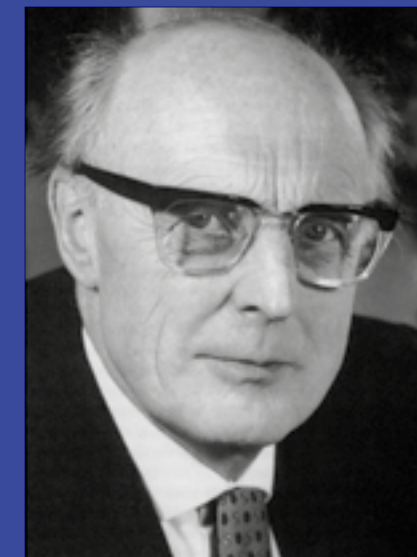
María Goeppert Mayer estudiando la abundancia de isótopos



Theodore von Kármán



Vannevar Bush y el presidente Harry Truman (1948)



Hans D. Jensen, coautor, junto a María Goeppert Mayer, de *Elementary Theory of Nuclear Shell Structure*

Vannevar Bush, *Science, the Endless Frontier. Report to the President on a Program for Postwar Scientific Research* (United States Government Printing Office, Washington 1945):

“Querido Dr. Bush: La Oficina de Investigación y Desarrollo Científico, de la que usted es director, representa una experiencia única de trabajo en equipo y cooperación en la coordinación de la investigación científica y en aplicar el conocimiento científico existente en la solución de los problemas técnicos vitales para la guerra. Su trabajo se ha desarrollado en el más absoluto secreto y llevado a cabo sin ningún tipo de reconocimiento público; pero sus resultados tangibles se pueden encontrar en los comunicados que proceden de los campos de batalla de todo el mundo. Algún día se podrá contar la historia completa de sus logros.

No existe, sin embargo, ninguna razón por la que las lecciones que se han obtenido con este experimento no puedan emplearse con provecho en tiempos de paz. La información, las técnicas y la experiencia investigadora desarrollada por la Oficina de Investigación y Desarrollo Científico, y por los miles de científicos de las universidades e industrias privadas, debería utilizarse en los días de paz que nos aguardan para la mejora de la salud nacional, la creación de nuevos proyectos que produzcan nuevos empleos, y el mejoramiento del nivel de vida nacional.

Es con tal objetivo en mente que querría tener sus recomendaciones sobre los siguientes cuatro grandes puntos:

Primero: ¿Qué se puede hacer, que sea consistente con la seguridad militar, y que cuente con la aprobación previa de las autoridades militares, para dar a conocer al mundo, tan pronto como sea posible, las contribuciones al conocimiento científico que se han realizado durante nuestro esfuerzo en la guerra?

La difusión de tal conocimiento debería ayudarnos a estimular nuevos proyectos, a proporcionar empleos para nuestros soldados que regresarán y también para otros trabajadores, así como para lograr importantes avances en la mejora del bienestar nacional.

Segundo: En referencia concreta a la guerra de la ciencia contra la enfermedad, ¿qué se puede hacer ahora para organizar un programa para continuar en el futuro el trabajo que se ha realizado en medicina y ciencias relacionadas?

El hecho de que las muertes anuales en este país, debidas sólo a una o dos enfermedades, sea muy superior al número de vidas que hemos perdido en batalla durante la guerra, debería hacernos conscientes del deber que tenemos con futuras generaciones.

Tercero: ¿Qué puede hacer ahora y en el futuro el Gobierno para ayudar a las actividades de investigación realizadas por organizaciones públicas y privadas? Debería considerarse cuidadosamente cuales deben ser las funciones propias de la investigación pública y privada, y su interrelación.

Cuarto: ¿Es posible proponer un programa eficaz para descubrir y desarrollar el talento científico en la juventud americana, de forma que se pueda asegurar el futuro de la investigación científica en este país en un nivel comparable a lo que se ha realizado durante la guerra?

Delante de nosotros se hallan nuevas fronteras de la mente, y si nos aventuramos en ellas con la misma visión, atrevimiento y determinación con que hemos manejado esta guerra, podremos crear un empleo más completo y fructífero y una vida más completa y más fructífera.

Espero que, tras realizar todas las consultas que estime conveniente con sus asociados y otros, pueda proporcionarme su considerado juicio sobre estos asuntos tan pronto como sea conveniente, informándome sobre cada uno de ellos cuando esté preparado, en lugar de esperar a completar todos sus estudios.

Muy sinceramente suyo

Franklin D. Roosevelt”.

En esta carta aparece con claridad la grandeza de miras que albergaba el presidente Roosevelt. No dejó que su mente olvidase que en el futuro habría, o debería haber, algo más que confrontación militar entre potencias, riesgos de guerras y que, por tanto, la investigación científica no debería quedar restringida, o severamente limitada, a la aplicación de sus inmensas posibilidades al ámbito militar. Con su carta a Bush mostró su intención de esforzarse firmemente por llevar cuanto antes la ciencia al dominio público.

Bush cumplió el encargo de Roosevelt produciendo el informe solicitado, que envió al presidente – ya no a Roosevelt, que había fallecido, sino a Truman – el 5 de julio de 1945. Al contrario que el informe de Von Kármán a Arnold, el de Bush se hizo público ese mismo año bajo el título de *Science, the Endless Frontier. Report to the President on a Program for Postwar Scientific Research* (Ciencia, la frontera sin fin. Informe al Presidente sobre un Programa para la Investigación Científica en la Posguerra).

Simplemente citaré algunas de sus conclusiones y recomendaciones, que seguían fielmente las líneas marcadas por Roosevelt.

Con respecto a la medicina, Bush señalaba que la “iniciativa y apoyo del Gobierno para el desarrollo de nuevos materiales y métodos terapéuticos descubiertos puede reducir el tiempo que se necesita para llevar los beneficios al público”, añadiendo que “está claro que si deseamos mantener el progreso en medicina que ha marcado los últimos 25 años, el Gobierno debería proporcionar apoyo económico a la investigación médica básica en las escuelas de medicina y universidades, mediante ayudas para investigación y para becas. La cantidad que se puede gastar razonablemente durante el primer año no debería exceder los 5 millones de dólares. Una vez que el programa esté en marcha, tal vez se puedan gastar 20 millones de años al año con eficacia”.

No olvidaba el director de la OSRD la relación de la ciencia con las Fuerzas Armadas, pero hacía hincapié en la necesidad de que existiese algún tipo de control civil: “Para estar bien preparados militarmente, se necesita una organización independiente, controlada por los civiles, que tenga una estrecha relación con el Ejército y la Marina, pero con fondos que procedan directamente del Congreso y con el claro poder de iniciar investigaciones militares que complementen y refuerzen las llevadas a cabo directamente bajo control del Ejército y la Marina”.

Con respecto al valor de la ciencia para la industria, escribió unas frases que mantienen aún hoy su vigencia: “Una nación que depende de otras para su nuevo conocimiento científico básico, será lenta en su progreso industrial y débil en su posición competitiva en el comercio mundial, independientemente de su habilidad mecánica”.

Y también quiero recordar lo que recomendaba con referencia al ámbito universitario: “*Colleges* y universidades privadas o públicas y los institutos de investigación deben proporcionar el nuevo conocimiento científico e investigadores formados [...]. Es sobre todo en estas instituciones en las que los científicos pueden trabajar en una atmósfera que se encuentra relativamente libre de la adversa presión que representa lo convencional, el prejuicio o la necesidad comercial [...]. Si los *colleges*, universidades e institutos de investigación tienen que cumplir las rápidamente crecientes demandas de nuevos conocimientos científicos procedentes de la industria y el Gobierno, su investigación básica debería ser reforzada utilizando fondos públicos”.

Las ideas que Bush defendía en su informe con respecto a lo que las universidades deberían hacer en el futuro se hicieron realidad en muchos casos, aunque los centros que algunas universidades establecieron y las investigaciones que desarrollaron no se limitaron a la “dimensión civil”, participando también de los intereses militares. De hecho, entre quienes apoyaron financieramente esos centros e investigaciones destacaron los militares.

Ahora y antes de pasar a la Universidad de Chicago, a la que en febrero de 1946 se incorporaron Joseph y María Mayer, lo mismo que anteriormente había hecho Fermi, Urey y Teller, es conveniente tratar de un programa de investigación con el que indirectamente estuvieron relacionados, como indiqué al final del capítulo precedente, algunos de los trabajos de María Goeppert Mayer.

Edward Teller y la bomba de hidrógeno

El 3 de septiembre de 1949, en una de las muestras que tomó uno de los aviones B-29 que la Fuerza Aérea estadounidense utilizaba para analizar el aire sobre Japón, Alaska y el Polo Norte, se encontraron evidencias, sobre el Pacífico Norte, cerca de Japón, de que se había producido la primera explosión nuclear soviética. Había tenido lugar el 29 de agosto (“Joe 1”, la denominaron los norteamericanos).

La explosión de la bomba atómica soviética significó el comienzo de una *carrera atómica*. En Estados Unidos, Ernest Lawrence y Edward Teller defendieron la idea de que había que contraatacar desarrollando una nueva arma que pudiese contrarrestar la de los soviéticos; fabricar una superbomba, mucho más poderosa que las de 1945, una bomba de hidrógeno, esto es, de fusión, que utilizase procesos similares a las reacciones termonucleares que tienen lugar en el interior de las estrellas, en las que partiendo de elementos ligeros se producen otros más pesados, emitiendo al mismo tiempo grandes cantidades de energía.

La idea de Teller de una bomba de fusión se remontaba a los primeros tiempos del proyecto atómico durante la guerra. En un seminario sobre la teoría de la bomba atómica, celebrado en julio de 1942, Teller aventuró la posibilidad de que se pudiera utilizar una bomba de fisión como detonante de otra de fusión, y en 1944 defendía la idea de que sería posible fabricar una bomba de implosión que utilizase deuterio y tritio como combustible. Pero Los Álamos se había creado para construir una bomba de fisión. Mas pese a la escasa recepción que tuvo su propuesta, Teller decidió proseguir por su cuenta sus estudios sobre esa posible bomba termonuclear. Y al finalizar la guerra, y dados los efectos de Hiroshima, pocos científicos querían proseguir en la investigación de armas nucleares. En consecuencia, no se había avanzado en el desarrollo de la bomba que deseaba Teller al no establecerse un programa adecuado (los soviéticos, por el contrario, estaban embarcados en el proyecto desde 1948). En 1949 la comunidad científica norteamericana no estaba tan unida como lo había estado algunos años antes, y se produjo una clara división de puntos de vista. Oppenheimer se opuso, lo que a la postre terminaría llevando a que la Atomic Energy Commission (AEC; la organización civil que pasaría a asumir en enero de 1947 el control de los asuntos nucleares en Estados Unidos, al dejar de existir el Manhattan Engineer District) le declarase un riesgo para la seguridad en 1953-54, negándole acceso a secretos atómicos. Por el contrario, Lawrence desarrolló una intensa campaña en favor de la nueva bomba, visitando personalmente la AEC, el Comité Conjunto de Energía Atómica, el Departamento de Defensa y hasta el Congreso. A partir de la posguerra, y especialmente en Estados Unidos, la gran ciencia (casi toda con aplicaciones militares) era ya una cuestión de Estado y como tal debatida en todo tipo de foros. Lejos estaban ya los tiempos en que prácticamente todo quedaba a merced de las iniciativas de los propios científicos, o de sus mecenas, los Siemens, Carnegie o Rockefeller. Por su parte, Teller realizó en 1950 un agresivo llamamiento a sus colegas que publicó en el *Bulletin of the Atomic Scientists* con el título de “Vuelta a los laboratorios”, en el que comparaba la situación internacional producida por la bomba nuclear soviética con la existente en 1939. Para el físico húngaro, la decisión del empleo de una bomba como la de hidrógeno era responsabilidad de los políticos, no de los científicos. En su opinión, el hombre de ciencia no era “responsable de las leyes naturales. Su trabajo es averiguar cómo operan esas leyes. El trabajo del científico consiste en encontrar la manera cómo estas leyes pueden servir

a la voluntad del hombre. En cambio no es su tarea determinar si una bomba de hidrógeno debe construirse, ni cuándo o cómo debe usarse”. En una clara alusión a las actividades en las que se ocupaban entonces otros físicos (como Pauli), Teller añadía que “nuestra comunidad científica ha estado en luna de miel con los mesones. Las vacaciones se han terminado. Las bombas de hidrógeno no se construyen por sí solas”. Análogamente, Luis Álvarez decía en junio de 1951: “Cualquiera que dedique su tiempo a trabajar sobre mesones es poco menos que un traidor”.

Para entender mejor la situación reinante en aquel momento, además de las relaciones de Estados Unidos con la Unión Soviética hay que tener en cuenta también que en 1949 los comunistas se hacían con el poder en China, bajo el liderazgo de Mao Tse Tung. Estos acontecimientos llevaron al Consejo de Seguridad Nacional estadounidense a defender la tesis de que Estados Unidos se enfrentaba a un periodo de máximo peligro y que para su seguridad debía procederse a un completo rearme, recomendando al presidente que se aprobase un presupuesto de entre 100 y 200 millones de dólares para la fabricación de la superbomba. Además, las confesiones del espía británico Klaus Fuchs de que había estado espionando para la Unión Soviética, y pasando información sobre los datos sobre la bomba de hidrógeno desde 1942, contribuyeron a inclinar la balanza del debate. El 31 de enero de 1950 Truman aprobaba la propuesta. Ese mismo día el presidente efectuaba la siguiente declaración pública: “Es parte de mi responsabilidad como Comandante en Jefe de las Fuerzas Armadas el asegurar que nuestra nación sea capaz de defenderse frente a cualquier posible agresión. En consecuencia he dado instrucciones a la Comisión de Energía Atómica para que continúe sus trabajos en todas las formas de armas atómicas, incluyendo la denominada de hidrógeno o superbomba.” Dos años y nueve meses después, Estados Unidos hacía explotar una bomba (*Mike*) 1.000 veces más potente que las de 1945. Tres años y pocas semanas después, los soviéticos hacían estallar su *Mike*, en Asia central.

Con la orden de Truman, los presupuestos del programa nuclear estadounidense se dispararon. Los gastos del programa entre 1947 (318, 3 millones de dólares) y 1952 (1.766,4) casi se sextuplicaron, iniciándose un cambio cuantitativo a partir de 1949 (631,9 millones de dólares).

Al abrigo de los intereses militares, la investigación civil en el dominio de la fusión, esto es, las investigaciones cuyo objetivo eran desarrollar sistemas técnica y económicamente viables para producir energía, se vieron favorecidas. No es ninguna casualidad que hayan sido Estados Unidos, la Unión Soviética y Gran Bretaña las naciones que más se han distinguido en este campo científico. En el caso norteamericano, como fruto de la decisión de Truman de fabricar la superbomba, en 1951 se establecieron en la Universidad de Princeton dos laboratorios dedicados a la fusión: uno, denominado “Matterhorn B” (la B de “bomba”), dirigido por John A. Wheeler, antiguo colaborador de Niels Bohr, maestro de Richard Feynman y veterano del Proyecto Manhattan, que estaba convencido de la nece-

sidad de disponer de superbombas, y el otro, “Matterhorn S” (la S de “Stellator”, la “Máquina de las estrellas”, el nombre con el que se bautizó al instrumento desarrollado para estudiar los plasmas de fusión), dirigido por el astrofísico Lyman Spitzer, que, no sorprendentemente dada su especialidad, estaba muy interesado en las reacciones termonucleares controladas. Wheeler lo estaba en las reacciones explosivas, pero necesitaba del conocimiento básico que se generase en el laboratorio de Spitzer, en donde, de hecho, se llevaron a cabo importantes avances en la teoría de la fusión controlada y en el diseño del “Stellator”, aunque éste probó ser menos interesante que el correspondiente aparato desarrollado por los soviéticos: el “Tokamak”.

El caso de la bomba de hidrógeno sirve también para entender la mentalidad, las razones, por las que científicos de primerísima línea (como sin duda fueron algunos de los que participaron, en Estados Unidos al igual que en la Unión Soviética, en su fabricación) decidieron contribuir a resolver los problemas existentes para construir esa bomba, sin que mediase el condicionante de encontrarse sumergidos en una guerra mundial. Naturalmente, hay tantas respuestas a esta cuestión como científicos, tan diverso es el universo de las psicologías individuales. Yo me limitaré a las razones de uno especialmente destacado, el físico soviético Andrei Sajarov (1921-1989), quien después de contribuir decisivamente a que la Unión Soviética dispusiese de la bomba de hidrógeno, terminó siendo un notable opositor al régimen comunista y recibiendo el Premio Nobel de la Paz en 1975.

En sus memorias, Sajarov recordó cómo había comenzado a trabajar en este campo:

“En 1948, nadie me preguntó si quería o no tomar parte en este trabajo [contribuir a la construcción de una bomba de hidrógeno]. No tuve oportunidad de elegir, pero me entregué totalmente, con gran concentración, una absorción total y mucha energía, por propia voluntad. Ahora que han pasado tantos años, me gustaría explicar los motivos de mi dedicación, a mí mismo sin ir más lejos. Una de las razones de ello (aunque no la principal) fue la posibilidad de hacer ‘física superior’ (el comentario de Fermi sobre el programa de la bomba atómica). Mucha gente pensó que su comentario era cínico, pero el cinismo normalmente presupone la duplicidad, mientras que yo creo que Fermi era completamente sincero, aunque bien pudo haber estado guardándose la auténtica cuestión. No se debe olvidar que el comentario completo de Fermi, ‘*Después de todo*, es física superior’, indica que hay otro lado de la cuestión”

Que la fusión termonuclear era para Sajarov “física superior” queda reflejado en sus siguientes palabras: “La física de las explosiones atómicas y termonucleares es un verdadero paraíso para los teóricos [...]. Una reacción termonuclear – la misteriosa fuente de energía del Sol y de las estrellas, el sustento de la vida en la Tierra, pero al mismo tiempo un potencial instrumento de su destrucción – estaba a mi alcance. Estaba tomando forma en mi mesa [...]. En aquellos momentos lo

más importante para mí, y creo que también para Tamm y los demás miembros del grupo, era la convicción de que nuestro trabajo era *esencial*". Por supuesto, se daba cuenta de que "las armas que se estaban construyendo eran de naturaleza inhumana y aterradora. Pero la guerra que acabábamos de pasar también había sido un ejercicio de barbarie; y a pesar de que yo no había luchado en ese conflicto, me consideraba a mí mismo un soldado en esa nueva guerra científica".

En estas palabras de Sajarov se comprueba el atractivo que tiene para los científicos la buena investigación científica, atractivo que con frecuencia pasa por encima de prácticamente cualquier otra consideración. Incluso para aquellos que, como terminó siendo el caso de Sajarov, poseen sensibilidad moral y valor cívico. El siglo xx fue testigo de numerosos ejemplos en este mismo sentido.

Y ahora ya podemos regresar a María Goeppert Mayer.

María Goeppert Mayer en la Universidad de Chicago

La idea de crear un Instituto de Estudios Nucleares en la Universidad de Chicago, mencionada al principio de este capítulo, precedió al final de la guerra. La experiencia del Laboratorio Metalúrgico (Metallurgical Laboratory) al que ya hicimos referencia en el capítulo 4, asociado al Proyecto Manhattan y dirigido por Arthur Compton, que pronto dejaría de existir dejando paso al Argonne National Laboratory, inducía a sustituirlo por algún otro centro interdisciplinar parecido, en el que pudiesen trabajar algunos de los científicos que se habían reunido en aquel durante los años de la guerra. La idea la promovió el astrónomo Walter Bartky, que había sustituido a Compton en la dirección del Departamento de Física de Chicago. Bartky quería que Fermi dirigiera el futuro instituto pero éste no deseaba implicarse en tareas administrativas, por lo que la dirección terminó recayendo en Samuel Allison. Eso sí, Fermi aceptó instalarse definitivamente en la Universidad de Chicago.

Pero más importante que Bartky en la creación del nuevo instituto fue Harold Urey. Lo que el descubridor del deuterio quería era mantener el grupo que se había reunido en la Universidad de Columbia, esto es, Fermi, Joseph y María Mayer y Teller. De acuerdo con ellos, Urey dirigió su mirada inicialmente a la costa norte del Pacífico, donde las condiciones de vida eran mejores que en el centro del país o en la costa este. En julio, Urey informó a Teller que se había reunido con el presidente y miembros del Departamento de Química de la Universidad de Washington (en el estado de Washington), donde su idea fue recibida favorablemente. Sin embargo, al reflexionar, Urey terminó dándose cuenta de que existirían problemas si el instituto se instalara en una universidad estatal que no había tenido experiencia durante la guerra en contratos de investigación, y donde nadie sabía cómo crear un instituto de investigación; más aún, al ser una universidad pública cualquier iniciativa tendría que contar con la autorización no sólo de

los regidores de la universidad sino también de los legisladores del Estado, y esto requeriría mucho tiempo y esfuerzos. Así que la Universidad de Chicago era una opción mucho mejor.

Al abandonar Los Álamos tras el final de la guerra, de regreso a Nueva York, donde aún era profesor en Columbia, Urey pasó por Chicago recibiendo la oferta firme de establecer un Instituto de Estudios Nucleares, en el que él tendría un puesto, que compartiría con una cátedra en el Departamento de Química. Le dijeron que habían ofrecido también un puesto a Teller en el Departamento de Física y que estaban considerando seriamente hacer una oferta a Joseph Mayer. Y en este punto puedo retomar el inicio del presente capítulo, la visita que tres representantes de la Universidad de Chicago hicieron a Santa Fe, y que Laura Fermi describió en su libro *Atoms in the Family* como sigue:

"La idea de un instituto de investigación nació en Chicago durante la primavera que precedió al final de la guerra. Arthur Compton había estado meditando qué sería lo mejor para mantener unidos a algunos de los físicos, biólogos, químicos, ingenieros e incluso metalúrgicos que había reunido en el Laboratorio Metalúrgico [...].

A mediados de julio [de 1945] se pensó que proceder mediante correspondencia ya no era adecuado, que era necesaria una reunión entre representantes de la universidad y un número reducido de científicos. Harold Urey, Samuel K. Allison, Cyril S. Smith y Fermi debían ser consultados. Pero los tres últimos estaban extremadamente ocupados en Los Álamos durante aquel julio de 1945. No podían ir a Chicago. El vicepresidente de la universidad, Gustafson, Walter Bartky, director de la división de Física de la universidad, y Harold Urey estaban dispuestos a hacer el viaje a Nuevo México, pero no tenían pases para entrar en Los Álamos. Los seis se reunieron en Santa Fe [...].

Allí, alrededor de un puñado de sándwiches, trataron de las políticas del futuro instituto. No estaría dividido en departamentos. Constituiría un centro de reunión de la ciencia y la industria. La industria podría proporcionar al instituto apoyo financiero y en retorno recibir consejos científicos e información sobre el progreso de la investigación.

El nuevo instituto necesitaba un director, y los seis lo trataron entre ellos. Harold Urey dijo que él se había ocupado de tareas administrativas y creía que no era adecuado para ellas. Fermi nunca había hecho trabajo administrativo, pero estaba seguro que no servía para ello. Cyril Smith era un metalúrgico que había estado en la industria antes de unirse al proyecto del uranio. No tenía experiencia, dijo, en asuntos universitarios. Sam Allison no pudo pensar en ninguna buena excusa y fue nombrado allí mismo director. No obstante, Sam Allison expresó algunas dudas: la responsabilidad de dirigir la investigación en biología y metalurgia, además de en física y química, era demasiado grande. La biología y la metalurgia estaban demasiado alejadas de su campo de investigación. Al final

se establecieron tres Institutos de Investigación Básica: el Instituto de Estudios Nucleares, el Instituto de Metales y el Instituto de Radiobiología. Allison fue el director del primero [...].

Los Institutos de Investigación Básica comenzaron a funcionar a comienzo de 1946. Y así llegamos a vivir en Chicago”.

Del grupo que Urey tenía en mente quien más dudó fue Teller, que tenía esperanzas de continuar trabajando en Los Álamos en el proyecto de una bomba de hidrógeno, pero, como explicó en sus memorias, el día después de que se firmó la rendición de Japón “Oppenheimer vino a mi oficina para decirme que ‘habiendo finalizado la guerra ya no había ninguna razón para continuar trabajando en la bomba de hidrógeno’. Su afirmación fue inesperada. Y también definitiva. No había forma de que yo pudiera argumentar algo; ninguna manera de poder hacer cambiar a Oppenheimer de opinión”. La Universidad George Washington le estaba esperando después de cuatro años de ausencia, pero finalmente decidió aceptar la oferta de Chicago. La iniciativa de esta de “continuar la investigación nuclear reuniendo científicos del Proyecto Manhattan en un instituto especial dirigido por Fermi”, le atraía poderosamente. En sus memorias también se lee: “Además de Fermi, la universidad había contratado a Harold Urey, James Franck [que, como vimos, se había unido a la universidad antes del inicio de la guerra], Leo Szilard, Cyril Smith y Joe y María Mayer. La invitación de unirme a mis amigos era demasiado tentadora como para rechazarla”. Posteriormente también se unieron al Instituto, entre otros, Gregor Wentzel y Subrahmanyan Chandrasekhar.

Efectivamente, Joseph y María Mayer también dejaron la Universidad de Columbia por la de Chicago. A Joseph le ofrecieron una cátedra y ser miembro del Instituto de Estudios Nucleares. Aceptó. Esta vez María también fue tenida en consideración: se le ofreció un puesto de profesor asociado en la universidad, pero, una vez más, también aquí la universidad se acogió a las reglas antinepotismo para negarle un sueldo. No obstante, por primera vez tendría un despacho y podría participar sin trabas en las actividades de la universidad, las del Instituto de Estudios Nucleares entre ellas. “La Universidad de Chicago – manifestó años después – fue el primer lugar en el que no me consideraron una molestia, sino que me recibieron con los brazos abiertos”. Los años de Chicago fueron su “Edad de Oro” científica.

Casi al mismo tiempo, el recién creado Argonne National Laboratory le ofreció un puesto, esta vez pagado, de *senior physicist*; sin duda ayudó el que el director del centro fuese su antiguo alumno, Robert Sachs. Este laboratorio se fundó el 1 de julio de 1946, al desaparecer el Laboratorio Metalúrgico, para llevar a cabo investigaciones en ciencia nuclear básica y para el desarrollo de usos, especial pero no únicamente, pacíficos de la energía nuclear, y dependía de la Universidad de Chicago bajo contrato con la Atomic Energy Commission. Estaba ubicado en el Bosque de Argonne, a unos 40 kilómetros del sudoeste de Chicago. María aceptó

Joseph y María Mayer también dejaron la Universidad de Columbia por la de Chicago. A Joseph le ofrecieron una cátedra y ser miembro del Instituto de Estudios Nucleares. Aceptó. Esta vez María también fue tenida en consideración: se le ofreció un puesto de profesor asociado en la universidad, pero, una vez más, también aquí la universidad se acogió a las reglas antinepotismo para negarle un sueldo. Los años de Chicago fueron su “Edad de Oro” científica.

la oferta y se convirtió en la primera persona que utilizó una computadora electrónica para obtener la solución del problema de la criticidad (el estado de un reactor cuando la reacción en cadena es autosostenida) de un reactor reproductor (*breeder reactor*) de metal líquido. Empleó el método de Montecarlo para realizar la programación del ENIAC (*Electronic Numerical Integrator And Computer*, esto es, Computador e Integrador Numérico Electrónico), el primer ordenador electrónico, que estaba ubicado en el Laboratorio de Investigación Balística del Aberdeen Proving Ground (una instalación del ejército estadounidense) en Maryland. (Un resumen de este trabajo se publicó en 1951, dentro de la serie *U.S. Department of Commerce, Applied Mathematics*).

Un detalle interesante, que muestra lo importante que fue para María su incorporación en Chicago al Argonne National Laboratory, así como el influjo de los colegas que encontró en la universidad, es el hecho de que cuando llegó sus conocimientos de física nuclear eran escasos; su especialidad era la mecánica cuántica, un instrumento necesario para esa rama de la física, que iba más allá, concentrándose en el estudio del núcleo atómico. A Joan Dash le confesó que había llegado a Chicago “con muy pocos conocimientos de física nuclear. Me tomó algún tiempo encontrar mi camino en este, para mí, nuevo campo (no lo era del todo, ya que en la década de 1930 había publicado dos artículos que incidían en esa materia). Pero en la atmósfera de Chicago era bastante fácil aprender física nuclear”. Y no por disponer de libros: “Nunca [aprendí mucho] de los libros. Leí libros ocasionalmente, pero no me sentaba a aprender de ellos”. Se formó mediante un proceso de absorción que tenía lugar en los pequeños seminarios semanales que se celebraban en Argonne. Si tenemos en cuenta que María pasó a la historia de la física por resolver un problema de física nuclear, es fácil comprender la trascendencia que tuvo aquel nuevo giro en su carrera, subordinada una vez más a la de su marido.

Teller y Goeppert Mayer sobre el origen de los elementos

Al mudarse a Chicago, María pensaba continuar trabajando con Teller en el Proyecto Opacidad, cosa que hizo como consultora, a la vez que simultaneaba sus clases en la universidad; pero Teller, un año después de haberse instalado en Chicago, se mostró particularmente interesado en un nuevo problema que le tenía fascinado, el origen de los elementos, y quería que alguien trabajase con él, alguien que además tuviese sólidos conocimientos matemáticos. María era, obviamente, el candidato ideal. Y ella aceptó.

Que Teller estuviera interesado en este problema no es sorprendente, dado lo mucho que le importaba fabricar una bomba de hidrógeno. Y esto implicaba considerar un problema de síntesis de elementos: la reacción en la que dos isótopos de hidrógeno producen helio, y la energía que se produce, un proceso que tiene lugar en el interior de las estrellas. Su interés venía de años atrás, y coincidía con el de su amigo y colega en la Universidad George Washington D.C., George Gamow (de hecho, fue este quien puso como condición para aceptar una cátedra allí el que también se contratara a Teller). En la primavera de 1938, Gamow y Teller habían decidido dedicar la conferencia anual que organizaban en su universidad al problema de las fuentes termonucleares en las estrellas. Uno de los asistentes a aquella reunión fue Hans Bethe, que al llegar no sabía nada sobre el interior de estrellas, pero que al final de la conferencia elaboró un posible esquema de reacciones nucleares en las que intervenían el hidrógeno y el carbono y que producirían la suficiente energía como para explicar la radiación observada en el Sol. (Bethe se convertiría en uno de los mejores especialistas en nucleosíntesis estelar; en 1967 recibió el Premio Nobel de Física “por sus contribuciones a la teoría de reacciones nucleares, especialmente sus descubrimientos relativos a la producción de energía en estrellas”). Y poco después de la conferencia, un estudiante de Gamow, Charles Critchfield, propuso otra teoría del proceso de producción de energía denominado “reacción protón-protón” (H-H), que se iniciaba con la colisión entre dos protones que formaban un deuterón emitiendo un positrón y un neutrino. Se puede decir que fue entonces cuando nació el campo de la nucleosíntesis estelar.

Junto al problema de las transformaciones de elementos ligeros y de la energía que se producía en el interior de las estrellas, se hallaba el de la abundancia de elementos químicos en el Universo. En su libro autobiográfico, *My World Line. An Informal Autobiography* (1970), Gamow explicó que “en 1940 se creía incorrectamente que, en conjunto, el Universo era homogéneo químicamente, y que la abundancia relativa de los elementos estaba bastante bien representada por la constitución de nuestro Sol, las estrellas cercanas y el material interestelar. Se suponía que alrededor del 99 por ciento de la materia estaba formada por hidrógeno y helio en cantidades (y peso) casi iguales, estando el 1 por ciento restante constituido por los elementos pesados en cantidades decrecientes según aumentaba su peso atómico. Era natural suponer que las abundancias de elementos químicos



Fotografía de la década de 1950



María Goeppert Mayer en su despacho de la Universidad de Chicago



Científicos reunidos junto a la roca tallada que recordaba el origen del Argonne National Laboratory



Con miembros de la Universidad de Chicago en la Fiesta de Año Nuevo, c. 1960



Con colegas del Argonne National Laboratory

observadas universalmente no se debían a la nucleosíntesis dentro de estrellas individuales, algo que conduciría a una gran variedad de constituciones químicas, sino que se remontaban al estado ‘preestelar’ del Universo, cuando la materia estaba distribuida de manera completamente uniforme en el Universo”. Él mismo publicó en *Physical Review* (vol. 70, 1946) un artículo titulado “Expanding univers and the origin of elements”, que comenzaba con las siguientes palabras: “Actualmente, en general, se está de acuerdo en que las abundancias relativas de varios elementos químicos fueron determinadas por las condiciones físicas existentes en el Universo durante las fases tempranas de su expansión, cuando la temperatura y densidad eran lo suficientemente elevadas como para asegurar ritmos de reacción apreciables tanto para los núcleos ligeros como para los pesados”.

El mismo año que Gamow publicó este artículo, comenzó a dirigir la tesis doctoral de Ralph Alpher, quien había recibido en 1945 un título de *master* por la Universidad George Washington. Alpher, que compaginaba el trabajo que desempeñaba desde 1944 en el Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins, trabajando para la Armada (algo que hacía desde 1940), completó en 1948 su tesis: *The origin and relative abundance distribution of the elements*. Antes incluso de presentar su tesis ya había preparado junto a Gamow un artículo que avanzaba algunos de los resultados. Ese artículo es famoso, no tanto por su contenido sino por la, digamos, “circunstancia”. Se publicó en el volumen 73 (1948) de *Physical Review* bajo el título de “The origin of chemical elements”, y “la circunstancia” se encuentra en que iba formado por Ralph Alpher, Hans Bethe y George Gamow. Ahora bien, Bethe no tuvo nada que ver con el artículo, pero el “humorista” Gamow le incluyó sin consultarle porque quería “completar” la secuencia $\alpha\beta\gamma$ (α por Alpher, β por Bethe y γ por Gamow). Nótese, por cierto, que el artículo que María Goeppert Mayer y Edward Teller publicaron llevaba prácticamente el mismo título que el de $\alpha\beta\gamma$: “On the origin of elements”, y también se publicó en *Physical Review* (vol. 76, 15 de octubre de 1949; recibido en la revista el 22 de junio).

Según el resumen que precedía al artículo de “María G. Mayer y Edward Teller” – así, y en este orden lo firmaban –, su contenido era el siguiente: “Las abundancias de los elementos e isótopos indican que los elementos pesados y ligeros han sido producidos por procesos diferentes. El origen de los elementos pesados se discute en detalle. Se supone que los elementos pesados se formaron por un proceso de fisión a partir de un fluido nuclear rico en neutrones. Se hacen suposiciones sencillas acerca de este proceso de fusión y se calculan abundancias isotópicas para $62 \leq Z \leq 78$ [Z es el número atómico; el 62 corresponde al samario y el 78 al platino]. Se analizan las propiedades de un líquido rico en neutrones y los posibles detalles del proceso de fisión”.

En su libro *Cosmology and Controversy*, Helge Kragh explicó con claridad el contenido del artículo de Goeppert Mayer y Teller de la siguiente manera:

“No todos los modelos físico-nucleares de la formación de elementos se basaban en el gas primordial que suponían Gamow, Alpher y Herman [Robert Herman era un compañero de Alpher en el laboratorio Johns Hopkins, que se unió a los trabajos de Gamow y Alpher]. En 1948-49 María Goeppert Mayer y Edward Teller, entonces en la Universidad de Chicago, propusieron que mientras que los elementos ligeros podían haberse formado mediante reacciones en equilibrio termodinámico, el mecanismo de la formación de elementos pesados era muy diferente [...]. El punto de partida de Mayer y Teller era un fluido condensado de materia nuclear fría formado por, o teniendo, un gran exceso de neutrones. Este hipotético objeto primordial, un ‘polineutrón’, difería de las algo parecidas especulaciones de Gamow de 1942, que no comprendían toda la masa del Universo sino que tenían una masa menor que la de una estrella. Por consiguiente, el Universo temprano tendría que incluir una multitud de polineutrones, cuyo origen Mayer y Teller no explicaban. Se suponía que el polineutrón se rompía mediante una especie de proceso de fisión, primero en fragmentos muy pesados con un exceso de neutrones. Sin embargo, la ruptura del polineutrón no era una fisión ordinaria, sino la formación de pequeñas gotas que se separarían de la superficie del polineutrón. Después de una serie de reacciones nucleares, involucrando desintegración beta y evaporación de neutrones, se formarían elementos pesados estables a partir de las gotas. Mayer y Teller encontraban que este mecanismo era capaz de conducir a una distribución de isótopos pesados ($Z > 24$) que coincidía aproximadamente con las observaciones”.

El mismo año que apareció el artículo de Goeppert Mayer y Teller, George Gamow publicó un libro junto a uno de sus antiguos estudiantes, el ya citado Charles Critchfield, quien también había trabajado en Los Álamos durante la guerra. Entre los asuntos que trataba el libro, *Theory of Atomic Nucleus and Nuclear Energy-Sources*, se encontraba el del origen de los elementos, y es interesante leer lo que decían de la teoría de Mayer-Teller que, señalaban, estos les habían comunicado antes de que fuera publicada: “Pasamos ahora a otra, no menos fantástica imagen del origen de los elementos propuesta recientemente por Goeppert Mayer y Teller [la “otra” teoría era la que había propuesto Gamow en 1946 y desarrollado luego con Alpher]. En contraste con la teoría descrita antes, estos autores suponen que, en su estado más comprimido, el Universo estaba lleno de un *fluido nuclear neutro*. Al comenzar la expansión, este líquido nuclear debe haberse roto en un número de gotas de diferentes tamaños”. Y en este punto pasaban a considerar los posibles comportamientos de tales gotas, que, apuntaban, podrían “tener un diámetro de 1 Ångström, 1 centímetro o 1 kilómetro”, concluyendo que “Goeppert Mayer y Teller han sido capaces de demostrar que las masas de las nuevas partículas formadas serían del orden de unos cuantos cientos de veces la masa del protón. Sin embargo, debe admitirse que este punto de vista no explica mejor que cualquiera de las otras teorías la curva de abundancia observada, ya que conduce a una distribución gaussiana de

abundancia relativa entre los elementos muy amplia, y no ofrece ningún tipo de explicación para la extremadamente alta abundancia de los elementos ligeros”.

No parece que la teoría de Goeppert Mayer y Teller tuviera muchos adeptos. En una carta que Rudolf Peierls envió desde Birmingham a Ed Salpeter el 26 de enero de 1950 se leía:

“[D.] Wroe ha dirigido su atención a la cosmología y al origen de los elementos. Parece ahora como si la idea general de Teller y Mayer pudiera ser rescatada, suponiendo que el Universo era en algún momento tan pequeño que estaba completamente lleno de materia y densidad nuclear y baja temperatura, y entonces se expandió. Esto produce una condensación más o menos como en una cámara de niebla y el resto procede como en la imagen de Teller [y Goeppert Mayer]. Existen, por supuesto, muchas complicaciones y uno no puede estar todavía seguro de la respuesta”.

Peierls continuó investigando estas posibilidades y en 1952 publicó en *Physical Review* un artículo junto a K. S. Singwi y D. Wroe “The polynutron theory of the origin of the elements”, en el que suponían “un estado temprano en la expansión del Universo formado por un fluido homogéneo de densidad nuclear y baja temperatura”, y demostraban que “para valores razonables de las constantes, esto dejará, durante la expansión, a la materia en forma de gotas con las mismas propiedades que la que aparecen en la teoría ‘polineutrón’ de Mayer-Teller. Sin embargo, este modelo conduce necesariamente a una curva de abundancia en la que la cantidad de elementos pesados es al menos comparable con la de los elementos ligeros, lo que contradice la experiencia”.

El problema, el gravísimo problema de todas estas teorías, comenzando por la propuesta por Gamow y siguiendo por la de Mayer-Teller, es que su punto de partida no era el más adecuado. Actualmente se piensa que en los primeros momentos del *Big Bang* se forman únicamente elementos ligeros, básicamente hidrógeno y en menor cantidad helio, mientras que los elementos más pesados se “fabrican” en el interior de las estrellas, donde las presiones y temperaturas lo permiten. Y luego se difunden por el Universo cuando algunas de esas estrellas mueren en un descomunal estallido como supernovas. No se tardó mucho en comenzar a desarrollar esta otra visión del origen de los elementos químicos, una visión, una teoría, que encontró un apoyo sólido en un artículo de 127 páginas de extensión publicado en octubre de 1957 en *Review of Modern Physics*. Se titulaba “Synthesis of the elements in stars” e iba firmado por el matrimonio Margaret y Geoffrey Burbidge, William Fowler y Fred Hoyle. (En 1983, Fowler recibió el Premio Nobel de Física, compartido con Subramanyan Chandrasekhar, “por sus estudios teóricos y experimentales de las reacciones nucleares de importancia en la formación de los elementos químicos en el Universo”; en mi opinión – y en la de muchos otros científicos e historiadores – Fred Hoyle también debió recibirlo.)

Actualmente se piensa que en los primeros momentos del *Big Bang* se forman únicamente elementos ligeros, básicamente hidrógeno y en menor cantidad helio, mientras que los elementos más pesados se “fabrican” en el interior de las estrellas, donde las presiones y temperaturas lo permiten. Y luego se difunden por el Universo cuando algunas de esas estrellas mueren en un descomunal estallido como supernovas.

Del origen y abundancia de los elementos al modelo de capas

La sección precedente nos permite entender que ocuparse del origen y abundancia de los elementos químicos que pueblan el mundo recurriendo a la física nuclear, conducía a su vez a una comprensión mejor del Universo. Ahora bien, no solo la cosmología condujo a interesarse por la abundancia de los elementos, también promovió tales estudios una nueva ciencia, la geoquímica.

El origen de la geoquímica se remonta a la década de 1920, aunque solo se convirtió en una disciplina autónoma en torno a 1950. En el que posiblemente fue el primer libro de texto moderno de geoquímica, *Geochemistry* (1950), sus autores, los finlandeses Kalervo Rankama y Thure Sahama, hacían hincapié en la relación que la nueva disciplina mantenía con la física nuclear: “Entre la física nuclear y la geoquímica existe una zona de contacto en los estudios de abundancia [de los elementos químicos], y es evidente que los dos campos de estudio son capaces de contribuir mucho entre sí”. *Geochemistry* fue publicado, precisamente, por University of Chicago Press, y también en esta universidad era catedrático de química William Draper Harkins (1873-1951), uno de los primeros químicos que se interesó por la física nuclear, además de pionero de la geoquímica. Entre sus logros se encuentra el haber deducido el proceso básico de la fusión nuclear, esencial para la tan deseada bomba de hidrógeno de Teller, pero también se vislumbran en algunos de sus trabajos determinados aspectos de la aportación que María haría posteriormente a la estructura del núcleo. En un artículo que publicó en 1917 (“The evolution of elements and the stability of complex atoms”, *Journal of the American Chemical Society*), Harkins concluyó que, de media, los elementos con número atómico par eran unas 70 veces más abundantes en los meteoritos que los de Z impar, una relación conocida posteriormente como “regla de Harkins”. (El que se refiriese a los meteoritos es porque pensaba que estos constituían la mejor muestra disponible de los elementos existentes en el Universo y, por consiguiente, que analizándolos se podían extraer conclusiones acerca de la distribución de la

abundancia de los diferentes elementos químicos.) También concluía en ese artículo que los siete primeros elementos (según el orden de su abundancia) tenían un número atómico, Z , par y representaban casi el 99 por ciento del material de los meteoritos. Más tarde propuso otras reglas; por ejemplo, que átomos con número másico, A , par y un número impar de electrones nucleares, E , son extremadamente raros. Hay que advertir, sin embargo, que entonces – todavía no se había descubierto el neutrón – se suponía que los núcleos atómicos estaban formados por protones y electrones, de manera que A representaba el número de protones, mientras que ahora $A=Z+N$, donde N es el número de neutrones (para Harkins, $E=A-Z$). No he podido encontrar ninguna relación entre Joseph o María Mayer con Harkins, pero si lo he mencionado es porque, como ya he explicado, algunas de las ideas que Harkins manejó, como las que acabo de citar, formaban parte, actualizadas, de las que María consideró para llegar a su modelo de capas nucleares.

No fue únicamente Harkins quien transitó por esas sendas, también lo hizo el suizo-noruego Victor Goldschmidt (1888-1947), al que se considera el fundador de la geoquímica moderna, quien en 1926 señaló la extraña escasez de litio, berilio y boro, sugiriendo que tal hecho lo podría explicar la física nuclear. Que Goldschmidt estaba bien informado sobre física nuclear, lo demuestra una de sus obras de referencia, *Geochemische Verteilungsgesetze der Elemente* (1923–38; *La geoquímica de la distribución de los elementos*), publicada en las actas de la Academia Noruega de Ciencia, en una de cuyas partes, la editada en 1937, aparecen referencias a trabajos recientes en física nuclear, incluyendo la *Biblia* de Hans Bethe y colaboradores.

Fue este ambiente o, si se prefiere, esta tradición de indagación científica, la que favoreció el que María Goppert-Mayer llevase a cabo su trabajo. Esto y la investigación que realizó junto a Teller sobre el origen de los elementos químicos. Pero para explicar bien lo que María hizo es necesario introducir primero el concepto de “números mágicos” en física nuclear. (Según Steven Moszkowski, un estudiante de María Goeppert Mayer, el término “número mágico” fue acuñado por Eugene Wigner: “Wigner creía en el modelo de la gota líquida, pero reconoció en el trabajo de María Mayer evidencias muy fuertes en favor de las capas cerradas. Le pareció un poco como magia y así fue como se acuñó la expresión ‘Números mágicos’”).

Quizás la mejor explicación de los números mágicos se encuentra en un artículo que la propia María G. Mayer publicó en el número de marzo de la revista *Scientific American* en 1951 (“The structure of the nucleus”). En él escribía:

“Todo núcleo (excepto el hidrógeno, que está formado solo por un protón) está caracterizado por dos números: el número de protones y el número de neutrones. La suma de los dos es el peso atómico del núcleo. El número de protones determina la naturaleza del átomo; un núcleo con dos protones siempre es helio, uno con tres protones es litio, y así sucesivamente. Sin embargo, un

número dado de protones puede combinarse con varios números de neutrones, formando isótopos del mismo elemento. Algunos isótopos son estables; otros se desintegran por radiactividad. Algunos de los isótopos estables añaden fácilmente un neutrón; otros están mucho menos inclinados a hacerlo. Un hecho muy interesante es que protones y neutrones favorecen combinaciones de números pares; en otras palabras, protones y neutrones, al igual que los electrones, muestran una fuerte tendencia a emparejarse. En la lista de los 1.000 isótopos conocidos, no existen más que seis núcleos estables formados por un número impar de protones y un número impar de neutrones. Los demás núcleos impar-impar se rompen por radiactividad emitiendo un electrón positivo o negativo; esto conlleva cambios de carga, transformando un neutrón en un protón o un protón en un neutrón, creando una combinación par-par más estable de protones y neutrones. Además, determinadas agregaciones pares de protones y neutrones son particularmente estables. Uno de estos números mágicos es el 2. El núcleo de helio, con dos protones y dos neutrones, es uno de los núcleos más estables que se conoce. El siguiente número mágico es el 8, que representa al oxígeno, cuyo isótopo más común tiene ocho protones y ocho neutrones, y es notablemente estable. El siguiente número mágico es el 20, el del calcio. El calcio con 20 protones, tiene 6 isótopos estables, cubriendo un rango de número de neutrones de 20 a 28. Este es un número elevado de isótopos muy poco frecuente en la región baja de la tabla periódica. Entre estos elementos ligeros, la estabilidad relativa se puede determinar con mucha precisión en función de la energía de enlace. La masa neta de un núcleo es siempre menor que la suma de las masas de los protones y neutrones de los que está compuesto. La energía de enlace se calcula a partir de este ‘defecto de masa’ mediante la famosa relación de Einstein, $E=mc^2$, donde m representa el defecto de masa y c la velocidad de la luz. Tales cálculos demuestran de manera conclusiva que los núcleos con números mágicos 2, 8 y 20 tienen energías de enlace mucho mayores que sus vecinos. Pero para los elementos pesados por encima del calcio las energías de enlace no están determinadas con precisión, y debemos juzgar su estabilidad relativa mediante evidencias indirectas. Una de estas evidencias es el número de núcleos estables (esto es, no radiactivos) que existen con un número dado de protones o neutrones. Otra es la abundancia relativa en el Universo de un núcleo dado, ya que parece razonable suponer que los isótopos más abundantes son los más estables. Mediante estas pruebas el número 50 se suma a la lista de números mágicos. El estaño, con 50 protones, tiene 10 isótopos estables, más que cualquier otro elemento, y es mucho más abundante que los elementos vecinos en la tabla periódica. Lo mismo es cierto, pero en un grado algo menor, del número 28. Otro número mágico es 126: un isótopo con 126 neutrones los mantiene con mucha mayor fuerza que uno con 127 o con 128. Acaso el número mágico más notable de todos es el 82. Existen 7 núcleos estables que contienen 82 neutrones, yendo de isótopos del xenón al samario. El isótopo del bario con 82 neutrones representa el 2 por

ciento de la abundancia de ese elemento, y el isótopo del cerio con 82 neutrones representa el 88 por ciento de todo el cerio. Por último, 82 protones significa plomo, y el plomo es el producto estable final de la desintegración de los elementos pesados radiactivos que se pueden encontrar en la naturaleza. Existen otras indicaciones de la especial estabilidad de estos números mágicos. Por ejemplo, a los núcleos que contienen 50, 82 o 126 neutrones no les gusta añadir un neutrón extra: sus secciones transversales [o eficaces] para neutrones rápidos son inferiores, por varios factores de 10, que las de un núcleo medio de casi el mismo peso.

Por consiguiente, la lista de números mágicos es: 2, 8, 20, 28, 50 y 126”.

Pasaré a citar ahora lo que María Goeppert Mayer decía en los primeros compases de la conferencia que pronunció en Estocolmo cuando recibió el Premio Nobel, en los que explicaba cómo llegó a la investigación por la que consiguió el galardón:

“Uno de los rasgos principales que condujeron al desarrollo de la estructura de capas es la existencia de los habitualmente denominados números mágicos. Que existen tales números fue señalado por primera vez por Elsasser en 1933. Lo que caracteriza a un número mágico es que una configuración con un número mágico de neutrones, o de protones, es extremadamente estable sea cual sea el número de otros nucleones asociados. Cuando Teller y yo trabajamos en un artículo sobre el origen de los elementos me topé con los números mágicos. Encontramos que existían unos cuantos núcleos que tenían un mayor número de isótopos así como mayor abundancia cósmica de lo que nuestra teoría podría posiblemente explicar. Encontré entonces que esos núcleos tenían algo en común: bien tenían 82 neutrones, cualquiera que fuese el número de protones asociados, o 50 neutrones. Ochenta y dos y cincuenta son números ‘mágicos’. Que núcleos de este tipo sean tan abundantes indica que el exceso de estabilidad debe haber desempeñado una parte en el proceso de la creación de elementos.

Mi atención se dirigió entonces a los artículos de Elsasser escritos en 1933. En el año 1948 el conocimiento sobre las propiedades de los núcleos era muy superior al que Elsasser disponía. Los números mágicos no solo aparecían en los nuevos datos, sino que aparecían mucho más claramente que antes, en toda clase de procesos nucleares. Ya no era posible considerarlos como debidos a coincidencias puramente accidentales.

Los números mágicos, como los conocemos ahora son:

2, 8, 20, 28, 50, 82, 126

Y más importante, son los mismos para neutrones y protones”.

Como se deduce de esta cita, fue su investigación con Edward Teller lo que dirigió a María Goeppert Mayer a ocuparse de los números mágicos, pero los trabajos previos de Elsasser fueron su punto de partida.

Pero ¿qué contenían los artículos de Elsasser? Walter Elsasser (1904-1991), quien, como se mencionó en el capítulo 2, había coincidido con María Goeppert en Gotinga, mientras estuvo dedicado a la física (instalado desde 1935 en Estados Unidos, a partir de la década de 1940 se centró primero en la geofísica, y en la biología de sistemas más tarde), estuvo muy cerca de realizar dos descubrimientos sobresalientes, de esos que merecen un Premio Nobel. El primero sucedió en 1925, mientras estaba en Gotinga: en una breve nota que publicó en *Naturwissenschaften* realizó cálculos que favorecían la idea de que los electrones se comportaban también como ondas, algo que demostraron experimentalmente dos años después, en 1927, Clinton Davisson y Lester Germer, por un lado, y George Paget Thomson por otro (Davisson y Thomson recibieron por ello el Premio Nobel de Física de 1937). El otro descubrimiento tuvo lugar en París, en el laboratorio de Frédéric Joliot-Curie, a donde había llegado en 1933 después de que Hitler llegase al poder y estuvo algo más alejado, pero fue el que mencionaba María Goeppert Mayer en su conferencia Nobel. Elsasser se refería a él así en su autobiografía, *Memoirs of a Physicist in the Atomic Age* (1978): p187

“Un núcleo atómico está formado por un cierto número de ‘nucleones’ (un término colectivo que engloba tanto a protones como a neutrones, partículas de masa comparable). El número de nucleones puede variar desde uno, el propio protón puede ser el núcleo de un átomo de hidrógeno, hasta más de doscientos en los elementos más pesados conocidos. En aquella época la escuela de Niels Bohr en Copenhague había decidido que el núcleo era una aglomeración homogénea de nucleones sin mayor estructura interna: esto se conocía como el modelo de ‘la gota líquida’ del núcleo. Existía considerable evidencia empírica de que este modelo poseía algún grado de verdad; pero yo había desarrollado ciertas dudas (basadas en evidencias que serían demasiado largas de citar) y pensé que en algún momento se encontraría que el núcleo posee un grado de estructura interna. Decidí profundizar en la idea y una gran parte de mis esfuerzos en Francia los dediqué a esto. En el otoño de 1933, K. [Kurt] Guggenheimer, un químico-físico, llegó a París procedente de Berlín. Encontró un empleo temporal en el Laboratorio de Física Experimental, laboratorio del Collège de France. Como todo el mundo de la física se estaba empezando a cuestionar cómo se mantenía unido el núcleo, él y yo no pudimos evitar coincidir en este tema. Él tenía un gran conocimiento de cómo se mantienen unidas las moléculas partiendo de átomos. Existían muchas analogías con los núcleos pero ninguna igualdad, ya que las energías implicadas en el caso nuclear eran ciento de miles de veces mayores que en el caso molecular. No obstante, de la cinética de las reacciones químicas ordinarias, una cosa estaba clara. Las variaciones de las energías de enlace de los nucleones se reflejarían en muchos casos en las ‘abundancias’ nucleares. Abundancia es un término técnico para las proporciones relativas de los diferentes tipos de núcleos. Esto constituía una información reveladora porque se habían medido las abundancias de muchos tipos de núcleos. Yo propuse un trabajo

conjunto de investigación, pero no fuimos capaces de ponernos de acuerdo [esto no es totalmente cierto, puesto que publicaron un artículo conjunto – “Sur les anomalies dans les proportions des éléments et sur l’origine des corps radioactifs” – en el tomo 197 (1933) de la revista de la Académie des Sciences, *Comptes rendus*; JMSR], y en el verano de 1935 [sic] Guggenheimer publicó él solo dos artículos sobre las energías de enlace de los nucleones en el *Journal de Physique* [“Remarques sur la constitution des noyaux atomiques, I y II”; se publicaron en el tomo de *Journal de Physique* correspondiente a 1934; se habían recibido en la redacción de la revista el 9 de mayo y 9 de julio de ese año]. Meses más tarde me dijo que había encontrado un puesto en Inglaterra. Desapareció, y como ninguno de los dos era un buen corresponsal pronto perdí contacto con él. Yo había encontrado en 1935 un truco para obtener, al menos de forma aproximada, las energías de enlace de protones o neutrones individuales a partir de las energías de desintegración, medidas de manera directa, de núcleos muy pesados que eran radiactivos de manera natural. Esto me permitió mostrar detalladamente que descontando la capa nuclear final, la energía de enlace de un nucleón disminuye de repente hasta un tercio o un cuarto del valor precedente. Me quedé satisfecho porque había demostrado la existencia de capas, aunque pronto quedó claro que no eran simplemente análogas a las capas de los átomos. Más tarde, los números de nucleones para los que las capas están cerradas, 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, se denominaron ‘números mágicos’, pero como yo no formaba parte de la jerga de Los Álamos, no sé mucho sobre el origen de este término”.

En este punto Elsasser comentaba que realizó algunos otros trabajos teóricos sobre núcleos en aquel período (uno de ellos junto a Francis Perrin), pero no en el campo de lo que sería más tarde el “modelo de capas” definitivo. Y terminaba reconociendo los límites de lo que entonces pudo hacer:

“La comprensión más profunda de las fuerzas entre nucleones que aportó la estructura de capas nucleares solamente se logró dos décadas más tarde cuando, como resultado del Proyecto Manhattan y el subsiguiente tremendo crecimiento de la investigación nuclear en las universidades de todo el mundo, comenzaron a comprenderse cuantitativamente en detalle las fuerzas entre nucleones. En 1963 el Premio Nobel de Física se dividió entre Eugene Wigner, que obtuvo una mitad que había merecido mucho antes, y dos personas que habían desarrollado la teoría de la estructura de las capas nucleares. Fueron un físico teórico alemán, Hans Jensen, y una americana, María G. Mayer [...]. En un artículo que María Mayer escribió en la revista *Science* (vol. 165) en 1964, citaba apropiadamente mis contribuciones anteriores a este problema pero también señalaba, de manera perfectamente correcta, que la teoría matemática subyacente no habría podido ser comprendida antes de que el conocimiento de las interacciones nucleares hubiese estado suficientemente avanzado, algo que sólo sucedió en la década de 1950.

A lo largo de mi vida me han preguntado a menudo si no lamentaba el haber estado ‘tan cerca’ del Premio Nobel. Mi respuesta siempre ha sido que habría sido un precio demasiado alto a pagar por una decoración puramente externa. Después de todo, esto habría implicado que tendría que haber permanecido siendo un especialista nuclear a tiempo completo y que habría estado involucrado en todas las actividades que condujeron a Hiroshima, Nagasaki y todos esos otros desastres no confesados que aún se ciernen sobre la cabeza de la humanidad”.

Pero ¿cuál fue la contribución de Elsasser? Intentó formular una teoría de la estructura nuclear [“Sur le principe de Pauli dans les noyaux, I y II”, *Journal de Physique*, vols. 4 y 5, 1933 y 1934] que explicase las aparentes capas nucleares que había observado James H. Barlett [“Structure of atomic nuclei”, *Physical Review*, vol. 41, 1932] en núcleos ligeros que poseían 2, 8, 18 o 32 nucleones, a los que Guggenheimer – que estudió el problema desde el punto de vista de la química – añadió 50 y 82. Un punto importante es que Elsasser no se limitó en su trabajo a los elementos ligeros, incluyendo también los pesados en sus consideraciones, que basaba en el uso de pozos de potencial cuánticos. En aquellos años el principal oponente a un modelo nuclear de capas era Niels Bohr que estaba desarrollando por entonces su modelo del átomo compuesto [“Neutron capture and nuclear constitution”, *Nature*, vol. 137, 1936], al que me referí en el capítulo 4. Y la situación no mejoró cuando George Gamow asoció el modelo de la gota líquida que él mismo propuso al del átomo compuesto, que desarrollaron en sus aspectos matemáticos Gregory Breit y Eugene Wigner.

Básicamente, lo que Bohr argumentaba es que las medidas de la interacción nuclear sugerían que la fuerza entre dos nucleones era del mismo orden que la fuerza entre el núcleo y un solo nucleón; y que por consiguiente no era posible tratar a los nucleones de manera independiente y asignarles valores cuánticos, algo que sí se consideraba en un modelo de capas nucleares, en el que se trataba a los nucleones como a los electrones en el átomo de Bohr, que se movían en órbitas estables (niveles de energía) en el potencial producido por el núcleo y a los que se adjudicaban parámetros cuánticos. Para que existiera algo similar en los núcleos atómicos, esto es, capas de nucleones, era preciso considerar a estos como partículas independientes con parámetros cuánticos (espín, momento magnético...) similares a los de los electrones, y también – si se quería extrapolar la analogía – asumir que la interacción entre nucleones individuales fuese menor que la energía de enlace producida por un potencial nuclear central.

La gran cantidad de información empírica sobre la abundancia de los elementos químicos que María Goeppert Mayer había acumulado, en el transcurso de la investigación que había realizado con Teller sobre el origen de los elementos, era mucho mayor de la que habían dispuesto Elsasser o Guggenheimer. Esto la condujo a relacionarse con los números mágicos, e intentó interesar a Teller, pero éste

estaba ya centrado en el desarrollo del armamento nuclear. La ayudó en esta tarea su marido, apoyando su interés y ofreciendo su perspectiva de químico, mejor equipado en algunos aspectos para tratar cuestiones que implicaban regularidades para las que no se conocían explicaciones teóricas, como había sucedido en el caso clásico del desarrollo de la teoría de la valencia, que se había introducido antes de que se dispusiera del soporte teórico que le proporcionó la física cuántica.

María Goeppert Mayer presentó el resultado de su análisis sistemático de datos de abundancia de isótopos, que apoyaba la idea de la existencia de números mágicos en núcleos atómicos, en un artículo que apareció publicado en el número del 1 de agosto de 1948 de *Physical Review* (vol. 74, pp. 235-239; recibido el 16 de abril de 1948): “On closed shells in nuclei” (“Sobre capas cerradas en núcleos”). En la introducción se explicaba bien su contenido:

“Se ha sugerido en el pasado que determinados números especiales de neutrones o protones en el núcleo forman configuraciones particularmente estables [W. Elsasser, *J. de phys, et rad.* 5, 625 (1934)]. Nunca se ha presentado evidencia completa de esto, ni se reconoce generalmente cuán convincente es esta evidencia. El modelo de Hartree predice que veinte neutrones o protones (Ca^{40}) forman una capa cerrada. Algunos cálculos apoyan este hecho [E. Wigner, *Phys. Rev.* 51, 847 (1937); W. H. Barkas, *Phys. Rev.* 55, 692 (1939)]. Estas consideraciones no se repetirán aquí. En este artículo se presentarán los hechos experimentales que indican una particular estabilidad de las capas con 50 y 82 protones y con 50, 82 y 126 neutrones”.

Ahora bien, una cosa era saber de la existencia de esos números y su relación con la estabilidad de los núcleos y otra dar con una explicación teórica que lo sustentase. Y el gran logro de María Goeppert Mayer fue encontrar esa razón. A su favor estaba, además de su familiaridad con la “numerología” nuclear, sus sólidos conocimientos mecánico-cuánticos que la situaban en buena posición para enfrentarse a tal tarea, pero aun así necesitó un “empuje”, una sugerencia. Y esta se la brindó Enrico Fermi, cuyo despacho se hallaba cerca del de ella en la Universidad de Chicago. La propia María Goeppert Mayer explicó la historia de esa sugerencia en su conferencia Nobel:

“Por entonces Enrico Fermi se había interesado por los números mágicos. Yo tenía el gran privilegio de trabajar con él, no solamente al inicio sino también después. Un día [debió de ser a finales de 1948 o principios de 1949], según estaba saliendo de mi despacho, me preguntó: ‘¿Existe alguna indicación de acoplamiento espín-órbita?’ Solo si uno ha vivido con los datos tanto tiempo como yo podría haber contestado inmediatamente: ‘Sí, por supuesto, y esto explicaría todo’. Fermi lo dudaba, y me dejó con mi numerología”.

La consecuencia de un acoplamiento espín-órbita es que produce un desdoblamiento en los niveles de energía de los nucleones. Se sabía que este tipo de interacción tenía lugar en los electrones del átomo, debido a la interacción del

La ayudó en esta tarea su marido, apoyando su interés y ofreciendo su perspectiva de químico, mejor equipado en algunos aspectos para tratar cuestiones que implicaban regularidades para las que no se conocían explicaciones teóricas.

momento magnético asociado al espín de los electrones con su movimiento orbital alrededor del núcleo (producido por el campo central, originado por los protones cargados positivamente), pero el desdoblamiento es tan pequeño comparado con la energía total de enlace debida al potencial central, que se desestima en general, salvo para átomos muy pesados. La idea de Fermi-Mayer de que pudiera existir una interacción fuerte espín-órbita en el caso de los nucleones implicaba de entrada, como se indicó, que protones y neutrones se movían en órbitas dentro del núcleo.

En su artículo “María Goeppert Mayer: Atoms, molecules and nuclear shells” (*Physics Today*, 1986), Karen Johnson recogió una explicación sencilla que María Goeppert Mayer utilizó para explicar a su hija el acoplamiento espín-órbita:

“Piensa en una habitación llena de parejas bailando. Se mueven alrededor de la habitación en círculos, cada círculo dentro de otro. Cada círculo corresponde a un nivel de energía. Pero además de orbitar, cada pareja también está girando como una peonza. Supón ahora que, mientras están orbitando en el sentido contrario a las agujas de un reloj, algunas parejas están girando en el sentido de las agujas del reloj mientras que el resto lo hacen en sentido contrario. Las que giran al contrario que las agujas del reloj encontrarán más fácil desplazarse que las que giran en el otro sentido [...]. Todos los que alguna vez han bailado un vals rápido saben que es más fácil bailar en un sentido que en otro. Por consiguiente, en un círculo dado de bailarines, la energía necesaria para girar será diferente para parejas que giran en sentidos opuestos. De la misma manera, los nucleones con un momento angular orbital dado tienen dos energías posibles, dependiendo de si su espín es paralelo o antiparalelo al movimiento orbital. Este desdoblamiento del nivel de energía se denomina acoplamiento espín-órbita”.

En el capítulo IV (“Individual orbits in the nucleus”) del libro, *Elementary Theory of Nuclear Shell Structure* (1955), al que volveré a referirme más adelante, que María Goeppert Mayer escribió con Hans Jensen (con quien compartió el Premio Nobel), se daba una explicación más técnica del modelo. Al ser este un punto crucial, la citaré:

“Nuestro conocimiento de las fuerzas entre los nucleones está lejos de ser completo. El único hecho del que estamos seguros es que son de corto alcance. Son muy diferentes en carácter de las fuerzas coulombianas de largo alcance que gobiernan la constitución de la nube electrónica de los átomos. Por consiguiente,

se pueden tener serias dudas acerca de si es útil intentar emplear para el núcleo el mismo tipo de modelo que conduce a semejante entendimiento exhaustivo de la constitución atómica. Sin embargo, en tanto que conocemos tan poco de las fuerzas nucleares como 20 años atrás, no tiene mucho sentido intentar juzgar a partir de argumentos a priori lo satisfactoria que puede ser una descripción de la estructura nuclear a partir de uno u otro enfoque. Merece la pena, por consiguiente, construir simplemente un modelo nuclear que haga esencialmente las mismas suposiciones que las inherentes en la explicación de Bohr-Pauli de la tabla periódica, y entonces investigar en qué medida los datos conocidos sobre los núcleos se pueden explicar de esta manera. Además, los fenómenos relacionados con los números mágicos se establecen más fácilmente en términos de una estructura de capas. El bien establecido hecho de que esos números mágicos son los mismos para protones que para neutrones puede considerarse una indicación empírica de que los nucleones dentro del núcleo conservan un grado suficiente de individualidad. En consecuencia, esperamos que un enfoque que considere órbitas individuales de nucleones en el sentido mecano-cuántico pueda describir al menos algunas propiedades simples del núcleo. De hecho, como veremos, este sencillo modelo explica sorprendentemente bien un gran número de datos nucleares.

Supongamos, por tanto, que cada nucleón se mueve en un campo medio de fuerza $V(r)$, con simetría esférica, e independientemente de las posiciones instantáneas exactas de todos los demás nucleones. Las posibles 'órbitas nucleares' se caracterizan por un conjunto de números cuánticos (n, l, j, m_j) , igual que en el caso electrónico, y los correspondientes niveles de energía se rellenan sucesivamente con protones y neutrones. De acuerdo con el principio de Pauli, cada nivel protónico con número cuántico j [representa el momento angular total: la suma del momento angular orbital, l , y el momento angular del espín, s ; el momento angular está asociado al movimiento de rotación de un objeto] no puede contener más de $2j + 1$ protones; lo mismo sucede para los neutrones. Los niveles protónicos y neutrónicos caracterizados por el mismo conjunto de números cuánticos (n, l, j, m_j) no coinciden exactamente porque la fuerza de Coulomb, que actúa solamente en los protones, desplaza los niveles de energía del protón a energías más altas. Incluso la secuencia de los niveles puede diferir ligeramente para protones y neutrones porque las órbitas con l más bajo penetran más profundamente en el centro nuclear cargado, y la interacción de los protones con el campo coulombiano repulsivo es más fuerte en estas órbitas. Consecuentemente, al menos para núcleos con mayor carga, valores menores de l son menos favorecidos para protones que para neutrones".

María Goeppert Mayer presentó su argumentación de la importancia del acoplamiento espín-órbita en una carta al editor que se publicó en el volumen 75 (15 de junio de 1949; pp. 1969-1970; recibido el 4 de febrero de 1949) de *Physical Review*. La tituló "On closed Shell in nuclei, II". En él agradecía la ayuda que



Walter Elsasser



Hans Suess



Viktor M. Goldschmidt



Edward Teller y Eugene Wigner



María Goeppert Mayer en la entrega de los Premios Nobel de 1963. A su izquierda, Hans Jensen



Alfred Nobel



Con el rey de Suecia en la entrega de los Premios Nobel

María Goeppert Mayer presentó su argumentación de la importancia del acoplamiento espín-órbita en una carta al editor que se publicó en el volumen 75 de *Physical Review*. La tituló “On closed Shell in nuclei, II”. En él agradecía la ayuda que había recibido de Fermi; de hecho, parece que ofreció a este que firmase con ella la carta, pero Fermi se negó argumentando que como él era más famoso, todos pensarían que había sido el principal responsable del trabajo.

había recibido de Fermi; de hecho, parece que ofreció a este que firmase con ella la carta, pero Fermi se negó argumentando que como él era más famoso, todos pensarían que había sido el principal responsable del trabajo.

Es necesario insistir en la importancia que para llegar a la conclusión de cómo se podían explicar los números mágicos tuvieron sus conocimientos de los datos experimentales conocidos, así como su dominio matemático de la mecánica cuántica y de la teoría de grupos de rotación. En la conferencia, *The shell model (El modelo de capas)*, que pronunció en Estocolmo cuando recibió el Premio Nobel se refirió a esta interrelación entre teoría y experimento en la física nuclear. Merece la pena recuperar lo que dijo entonces:

“Existen esencialmente dos maneras en las que los físicos buscan en la actualidad obtener una imagen consistente del núcleo atómico. La primera, el enfoque básico, es estudiar las partículas elementales, sus propiedades e interacción mutua. Así se espera obtener conocimientos de las fuerzas nucleares.

Si se conocen las fuerzas, en principio se debería ser capaz de calcular deductivamente las propiedades de núcleos complejos individuales. Solamente después de que se haya logrado esto se puede decir que se comprenden completamente las estructuras nucleares [...].

El otro enfoque es el del experimentalista y consiste en obtener mediante la experimentación directa tantos datos de núcleos individuales como sea posible. De esta forma se espera encontrar regularidades y correlaciones que proporcionen una pista acerca de la estructura del núcleo [...].

El modelo de capas, aunque propuesto por teóricos, en realidad corresponde al enfoque experimentalista”.

Un descubrimiento simultáneo

En las primeras líneas de “On closed Shell in nuclei, II”, María Goeppert escribía: “Los espines y momentos magnéticos de núcleos pares-impares han sido utilizados por Feenberg y Nordheim para determinar el momento angular de la autofunción de la partícula impar”. Pero lo que es de interés aquí son los dos científicos que citaba: Eugene Feenberg (Washington University, St. Louis) y Lothar W. Nordheim (Duke University; alemán de nacimiento, doctorado en Göttinga en 1923). Ambos reaccionaron por separado al artículo de Goeppert Mayer del 1 de agosto de 1948 con artículos publicados el 15 de octubre de 1948 (Feenberg) y 1949 (Feenberg junto a Hammarck), y 1949 (Nordheim) en *Physical Review*, avanzando ideas que representaron las principales contribuciones al modelo de capas. María recibió copias de los artículos de Feenberg y Nordheim antes de que se publicaran (*preprints*), y ello hizo que tuviese dudas sobre si publicar su “On closed Shell in nuclei, II”. Acaso estos científicos se habían inspirado en su primer artículo, “On closed Shell in nuclei”, pero tal vez no. “Esperaré – le dijo a su esposo – y escribiré a *Physical Review* pidiéndoles que me avisen cuando se publiquen los artículos de estos científicos y les enviaré algo con el ruego de que lo publiquen al mismo tiempo. No debo tomar ventaja porque vi sus artículos”. Joseph no pensaba lo mismo, argumentando que una cosa era cortesía a colegas y otra ser demasiado puntillosa y que ella no debía nada a esos trabajos. *Physical Review* le informó que los artículos de Feenberg y Nordheim aparecerían en el número de junio de 1949 y que en vista de los diversos trabajos que se habían escrito sobre el modelo de capas, por qué no escribía ella una breve nota para que se pudieran comparar los diferentes tratamientos.

Finalmente, María lo hizo y escribió “On closed Shell in nuclei, II”. Y tal como había pedido, este artículo se retuvo y apareció en el número del 15 de julio de 1949, a la vez que el de Feenberg y Nordheim. Pero las interpretaciones teóricas que Feenberg y Nordheim ofrecían de la presencia de números mágicos resultaron incorrectas. Al mismo tiempo que esto sucedía, al otro lado del Atlántico, y en esta ocasión de forma completamente independiente de María Goeppert Mayer, se estaba gestando un trabajo parecido.

En el número del 1 de junio de 1949, *Physical Review* (vol. 75) publicaba en la sección *Letters to the Editor* un artículo-carta de menos de una página de extensión (p. 1766) que se había recibido en la redacción el 18 de abril (el de Goeppert Mayer se había recibido, recordemos, el 4 de febrero, pero se tenía retenido). Se titulaba “On the ‘Magic Numbers’ in nuclear structure” e iba firmado por Otto Haxel (Instituto Max Planck, Göttinga), J. Hans D. Jensen (Instituto de Física Teórica, Hamburgo) y Hans E. Suess (Instituto de Física Teórica, Hamburgo). “Si se supone – se lee en su resumen – que el acoplamiento espín-órbita, en la teoría de las fuerzas nucleares, en el campo de Yukawa conduce a un fuerte desdoblamiento del término con momento angular l en dos términos distintos $j = l \pm \frac{1}{2}$, entonces

del modelo oscilatorio del núcleo [H. A. Bethe y R. Bacher, *Review of Modern Physics* 8 82, 1937] se sigue inmediatamente una explicación sencilla de los ‘números mágicos’ 14, 28, 50, 82, 126”.

En un simposio celebrado en la Universidad de Minnesota en mayo de 1977, cuyos contenidos se recogieron posteriormente en un libro (*Nuclear Physics in Retrospect. Proceedings of a Symposium on the 1930s*), uno de los firmantes de aquel artículo-carta, Hans Edward Suess (1909-1993), explicó la génesis del trabajo. Cito algunos pasajes de su explicación:

“Podría señalar algunos puntos. Uno es que lo que hicimos en Hamburgo y lo que María [Goeppert Mayer] hizo en Chicago estaban completamente separados y no relacionados. No sabíamos nada los unos de los otros. Sin embargo, a partir de una aproximación completamente diferente, y bajo circunstancias totalmente distintas, nos vimos conducidos a precisamente el mismo resultado. Pero la gran diferencia se puede caracterizar mejor por lo que sucedió. En alguna ocasión Jensen señaló que si hubiese sabido más física nuclear teórica nunca habría creído una palabra de lo que yo le había contado. Realmente convencerlo fue un trabajo difícil para un mero químico, que utiliza métodos diferentes a los de un físico teórico. Utilicé lo que se considera generalmente ‘evidencia circunstancial’. Los químicos están acostumbrados a considerar simultáneamente un número de hechos y entonces deducir de ellos conclusiones, mientras que el deseo de los físicos teóricos habitualmente es considerar el resultado de un único experimento, o el fenómeno que quieren interpretar. Yo tenía estos números mágicos, no de María sino del gran mineralogista Viktor Moritz Goldschmidt, que no se menciona en nuestro artículo pero que los publicó en las Actas de la Academia Noruega en 1938. A partir de esa información podía ver que existía una ‘evidencia circunstancial’ que sin duda debía tener un significado físico. Por tanto comencé a jugar con estos números y encontré que realmente eran mágicos – quiero decir que se podía hacer con ellos todo tipo de cosas, tales como derivar progresiones matemáticas –. A continuación simplemente busqué en un libro de texto las soluciones de la ecuación de Schrödinger para el oscilador armónico tridimensional [hizo esto porque suponía, como hicieron otros antes, que se podía explicar el movimiento de los nucleones dentro del núcleo como debido a la acción de un potencial central, para lo que consideraba el caso de un oscilador]. (No me ocupé de las matemáticas porque se podían encontrar en cualquier libro de texto.) Entonces escribí los niveles que se obtenían, los ordené de acuerdo a su momento angular y utilicé el principio de Pauli para ver cuántas partículas podrían entrar en cada nivel. Esto daba los números incorrectos, pero lo que había que hacer era invertir la secuencia habitual de los valores del espín y empezar con el espín más alto. Si se incluye el valor más elevado de la capa anterior se obtienen precisamente los números mágicos. Entonces pensé que podía haber algo en esto, que acaso no era simplemente un truco mágico. Busqué en el artículo de Smith para ver si las paridades de los valores empíricos del espín para

las especies de números de masa impares se ajustarían a semejante esquema. Reuní todo esto y se lo mostré a Hans Jensen porque a mí me parecía que era bastante convincente, que había algo detrás de ello. Jensen dijo: ‘Oh, tengo que analizarlo yo mismo’, y se dedicó a repasar la literatura y a incluir cada valor de espín en el diagrama”.

Suess, en otras palabras, había encontrado que existían algunas relaciones entre los números mágicos y la abundancia de isótopos señaladas por Goldschmidt. Sin embargo, no sabía explicar realmente por qué existían y fue entonces cuando pidió ayuda a Jensen. En primera instancia – de nuevo según Suess – fue decir que ‘Todo esto no tiene sentido. No se ajusta en el esquema’. Pero pronto se le hizo la luz:

“El siguiente día vino y me dijo: ‘Bien, creo que hay algo en ello. Si el esquema que dibujaste significa algo, querría decir que existe un fuerte acoplo espín-órbita’. Le pregunté por qué debería existir un fuerte acoplo espín-órbita. Me contestó: ‘*Das hat der liebe Gott so gemacht*’ [‘El querido Dios lo hizo de esa manera’]. ‘Espera un minuto. Entonces escribió una nota para *Die Naturwissenschaften*, pero le dije: ‘Espera un minuto. Tengo un acuerdo con Haxel de que publicaríamos cualquier cosa que se nos ocurriera juntos’. Y Jensen estuvo de acuerdo en que pusieramos también el nombre de Haxel. Haxel también había estado preocupándose mucho por los números mágicos y se había dado cuenta de que debían tener algún significado. Fue, por consiguiente, simplemente un accidente el que nosotros en Alemania tuviésemos esta idea del acoplamiento espín-órbita fuerte. Yo desde luego no me di cuenta del significado profundo que tenía para la física nuclear básica”.

La nota publicada en *Die Naturwissenschaften* (vol. 35, p. 376, 1948) a la que se refería Suess iba firmada por O. Haxel, J. H. D. Jensen y H. E. Suess, y se titulaba “Zur Interpretation der ausgezeichneten Nukleonenzahlen im Bau der Atomkerne” (“Sobre la interpretación de los números mágicos de nucleones en la estructura del núcleo atómico”). Fue el preludio del ya mencionado “On the ‘Magic Numbers’ in nuclear structure” que apareció en *Physical Review*. Teniendo en cuenta que Suess reconocía que la idea fundamental del trabajo, la de existencia de un acoplamiento espín-órbita fuerte se debió a Jensen, es razonable que fuera él quien recibiera el Premio Nobel junto a María Goeppert Mayer.

También Jensen ofreció su versión de cómo llegaron a su descubrimiento. Lo hizo durante la conferencia que pronunció en Estocolmo cuando recibió el Premio Nobel:

“Los años de guerra y también los años que siguieron llevaron a los físicos en Alemania a un sofocante aislamiento, pero a la vez les proporcionaron algún tiempo libre para dedicarse a cuestiones al margen de los caminos trillados. En aquella época tuve muchas discusiones con Haxel en Berlín, y después en Gotinga, y con Suess en Hamburgo sobre los datos empíricos [relativos a los números

mágicos]. Para Suess estos se hicieron más y más importantes sobre todo por sus estudios cosmoquímicos: encontró que en el intervalo [con valores de N entre 2 y 128] los números Z y $N=50$ y $N=82$ destacaban también mucho. Haxel, al principio de forma independiente, encontró los mismos números en el estudio de otros datos nucleares.

Aunque mis dos colegas se esforzaron mucho por convencerme de que estos números podrían ser la clave para comprender la estructura nuclear, al principio yo no sabía qué hacer con ello. Pensé que el nombre ‘número mágico’, cuyo origen me era desconocido, era muy apropiado. Entonces, pocos años después de la guerra, tuve el privilegio de regresar a Copenhague. Allí, en un número reciente de *Physical Review*, encontré un artículo de María Goeppert Mayer, “On closed shells in nuclei” [el de 1948], donde ella también había reunido la evidencia empírica que señalaba la relevancia de los números mágicos. Aquello me dio el coraje para hablar sobre su trabajo, junto con nuestros resultados, en un seminario teórico. Nunca olvidaré aquella tarde. Niels Bohr me escuchó con mucha atención y planteó preguntas que se hicieron más y más vivas. En una ocasión señaló: ‘¡Pero esto no está en el artículo de la Sra. Mayer!’. Evidentemente, Bohr ya había leído y evaluado con cuidado su trabajo. El seminario se convirtió en una larga y animada discusión. Me impresionó mucho la intensidad con la que Bohr recibía, sopesaba y comparaba estos datos empíricos, datos que no se ajustaban en absoluto a su propia imagen de la estructura nuclear. A partir de aquella hora comencé a considerar seriamente la posibilidad de una ‘desmagización’ de los ‘números mágicos’.

Al principio intenté mantenerme tanto como me fuera posible en el viejo esquema. Para empezar, consideré solamente el espín del núcleo, ya que parecía existir una correlación simple entre los números mágicos de los nucleones y la secuencia de los espines nucleares y sus multiplicidades. La primera vez que pensé en el modelo de una sola partícula con un fuerte acoplamiento espín-órbita (afortunadamente, no estaba demasiado bien versado en la ‘biblia de Bethe’ y no recordé muy bien los viejos argumentos en contra de un acoplamiento espín-órbita fuerte) fue durante una excitante discusión con Haxel y Suess en la que intentamos incluir en este esquema todos los datos disponibles. Al hacer esto surgió el que, debido al acoplamiento espín-órbita, el número 28 de neutrones y protones también debería ser algo parecido a un número mágico. Recuerdo el placer que sentimos cuando encontramos algunas pistas en los todavía escasos datos que estaban disponibles entonces. Sin embargo, no estaba muy contento con el trabajo, y no me sorprendió realmente cuando una revista sería rechazó publicar nuestra primera carta, señalando que ‘no es realmente física sino más bien jugar con números’. Fue sólo al pensar en el vivo interés que había mostrado Niels Bohr sobre los números mágicos cuando me atreví a enviar la misma carta a Weisskopf, quien la remitió a *Physical Review*. Sin embargo, no fue hasta más tarde, hasta después de haber presentado nuestras ideas en un seminario en

Copenhague y haber sido capaz de discutir las con Niels Bohr, cuando finalmente gané alguna confianza. Uno de los primeros comentarios de Bohr me pareció notable: ‘Ahora comprendo por qué los núcleos no muestran bandas rotacionales en sus espectros’. Con la precisión disponible entonces para la medida, se habían buscado ese tipo de espectro en núcleos ligeros que, de acuerdo con el modelo de la gota líquida o modelos similares, deberían tener momentos de inercia relativamente pequeños y por consiguiente niveles rotacionales bastante separados. Pero, como sabemos ahora, estos núcleos ligeros, al igual que muchos otros, no muestran bandas rotacionales”.

Dos artículos fundamentales de María Goeppert Mayer

En realidad, “On closed Shell in nuclei, II” no pasaba de ser un esbozo no necesariamente convincente, era más bien una especie de sugerencia intuitiva de la relación entre los números mágicos y el acoplamiento espín-órbita. Tanto Joseph Mayer como Edward Teller apremiaban a María para que desarrollara el contenido de su carta al editor con un artículo más sustancioso, en el que desarrollase verdaderamente una teoría del modelo de capas. Le costó trabajo, pero lo consiguió. No con un único artículo sino con dos, que aparecieron de manera consecutiva en el número del 1 de abril de 1950 (vol. 78, pp. 16-21 y 22-23) de *Physical Review* (se recibieron el 7 de diciembre de 1949): “Nuclear configurations in the spin-orbit coupling model, I. Empirical evidence” y “Nuclear configurations in the spin-orbit coupling model, II. Theoretical considerations”.

En las primeras líneas de “Nuclear configurations in the spin-orbit coupling model, I. Empirical evidence”, Goeppert Mayer se refería de forma muy sucinta a los trabajos anteriores en notas a pie de página (que yo incluyo entre paréntesis cuadrados):

“Los núcleos que contienen 2, 8, 20, 28, 92 o 126 neutrones o protones son particularmente estables [W. Elsasser, *J. de phys. et rad.* 5, 625 (1934); M. G. Mayer, *Phys. Rev.* 74, 235 (1948)]. Estas capas cerradas han sido explicadas de diferentes maneras [E. Feenberg and K. C. Hammack, *Phys. Rev.* 75, 1877 (1949). L. W. Nordheim, *Phys. Rev.* 75, 1894 (1949)]. También se ha señalado que los números mágicos se pueden explicar considerando la idea de una sola partícula y suponiendo un fuerte acoplamiento espín-órbita [Haxel, Jensen, and Suess, *Phys. Rev.* 75, 1766 (1949); M. G. Mayer, *Phys. Rev.* 75, 1969 (1949)]. En este artículo se discutirá la evidencia que apoya este punto de vista”.

Y en el segundo artículo ofrecía la explicación teórica:

“No se ha realizado ningún intento [hasta el momento] de explicar el acoplamiento espín-órbita. El objeto de este artículo es investigar si existen razones teóricas para estas reglas empíricas. Para este propósito, se ha supuesto que existe un potencial atractivo que actúa entre nucleones idénticos”.

Es muy probable que sin la publicación de estos dos artículos la contribución de María Goeppert Mayer al modelo nuclear de capas habría sido mucho menos valorada y podría haber pasado bastante desapercibida. Jensen, Suess y Haxel no tuvieron tantas dudas para ampliar su primer artículo en *Naturwissenschaften*. El mismo año que apareció su carta en *Physical Review* publicaron dos artículos más en la antes mencionada revista alemana: Otto Haxel, J. H. D. Jensen y H. E. Suess, “Zur Interpretation der augsezeichneten Nucleonenzahlen im Bau der Atomkerne: II. Mitteilung”, *Naturwissenschaften* 36, 153-155 (1949); y J. H. Jensen, H. E. Suess y O. Haxel, “Modellmäßige Deutung der ausgezeichneten Nucleonenzahlen im Kernbau” (“Interpretación de la estructura nuclear basada en el modelo de los números mágicos de nucleones”), *Naturwissenschaften* 36, 155-156 (1949).

La colaboración de María Goeppert Mayer y Hans Jensen

En la historia de la ciencia no es infrecuente encontrar polémicas sobre prioridades, sobre quién había sido el primero en realizar un descubrimiento. A la memoria viene inmediatamente el célebre – y bastante miserable por el comportamiento de ambos – enfrentamiento entre Isaac Newton y Gottfried Leibniz, reclamando la prioridad en la invención del cálculo infinitesimal. En el caso del modelo de capas tal vez podría haberse producido algo parecido entre María Goeppert Mayer y Hans Jensen, aunque probablemente no hubiese sido tan violento como el que enfrentó a aquellos dos gigantes. Pero esto no sucedió en absoluto, aunque sin duda, inicialmente, ambos lamentasen no haber sido los únicos en ser responsables del hallazgo. De hecho, lo que sucedió es que pronto comenzaron a cartearse, refiriéndose María a “nuestra teoría” y Hans en sus respuestas a “su teoría”.

Johannes Hans Jensen (1907-1973) había estudiado en Friburgo y Hamburgo, donde se doctoró en 1934, habilitándose en 1936. Estuvo ligado a varias asociaciones del partido nacionalsocialista de Hitler: 1933, miembro de la Nationalsozialistischer Deutscher Dozentenbund (Liga Socialista Alemana de Docentes Universitarios; DSDDDB); 1934 de la Nationalsozialistischer Lehrerbund (Liga Nacional Socialista de Profesores; NSLB); 1937, del Nationalsozialistische Deutsche Arbeiterpartei (Partido Nacional Socialista de los Trabajadores Alemanes; NSDAP). No obstante tales afiliaciones y que durante la Segunda Guerra Mundial trabajó en el proyecto nuclear alemán (por ejemplo, junto a Paul Harteck, en el desarrollo de dobles centrifugadoras para la separación de isótopos de uranio; también Otto Haxel y Hans Suess trabajaron en el proyecto atómico, aunque ellos no militaron en el partido nazi), Jensen distaba de ser un nazi: durante una visita que realizó a Copenhague en 1943 transmitió a Niels Bohr, de forma indirecta, información acerca de los trabajos que Heisenberg estaba realizando sobre reactores nucleares, implicando que Alemania se encontraba lejos de poder fabricar una bomba atómica, una noticia muy valiosa para los Aliados. En 1943 fue nombrado profesor asociado de física teórica en el Politécnico de Hannover, en el que

En la historia de la ciencia no es infrecuente encontrar polémicas sobre prioridades, sobre quién había sido el primero en realizar un descubrimiento. A la memoria viene inmediatamente el célebre – y bastante miserable por el comportamiento de ambos – enfrentamiento entre Isaac Newton y Gottfried Leibniz, reclamando la prioridad en la invención del cálculo infinitesimal.

ascendió a catedrático en 1946. Dejó Hannover en 1949 cuando fue nombrado catedrático en Heidelberg.

Goeppert Mayer y Jensen se conocieron en persona en el verano de 1950, cuando el matrimonio Mayer viajó a Alemania en calidad de asesores del Departamento de Estado, encargados de facilitar la reanudación de las relaciones entre físicos y químicos estadounidenses y alemanes. Llegaron en agosto y permanecieron en Alemania tres meses. Jensen aprovechó la ocasión para que su universidad, la de Heidelberg, invitase a María en el verano siguiente (en 1950 había sido elegida miembro de la academia de Ciencias de Heidelberg). Los Mayer correspondieron, y en 1951 Jensen viajó durante varios meses por Estados Unidos como conferenciante invitado, regresando entre conferencias a Chicago donde se alojaba en casa de María y Joseph; en total pasó con ellos en torno a dos meses. Ante semejante situación no es sorprendente que decidieran escribir juntos un libro, dedicado a desarrollar las implicaciones del modelo de capas. Parece que fue Jensen de quien partió la idea. Más tarde Jensen confesó a María Goeppert que tuvo en mente favorecer la posible candidatura futura de ambos a un Premio Nobel, y no solo “publicitando” el modelo de capas sino haciendo que los dos tomaran mayor protagonismo, porque de otro modo tendrían un problema: Suess y Haxel había ayudado a Jensen a reunir los datos experimentales, lo que haría cuatro candidatos al galardón, pero los estatutos de la Fundación Nobel no permitían que cuatro personas compartieran un Premio Nobel; tres era el máximo.

También era importante difundir el modelo de capas, mostrar su utilidad, porque durante algún tiempo no todos los físicos creían en él. Aunque Fermi estaba convencido, y también Weisskopf, que era quien había pasado la carta de Jensen, Suess y Haxel a *Physical Review*, otros no lo consideraban válido. En la biografía de María Goeppert Mayer que escribió Joan Dash se narra lo sucedido en un seminario que María Mayer dio en Princeton, y que estaba dirigido por Oppenheimer:

“Su voz, como siempre, era casi un susurro, el canto alemán compitiendo con el británico. Estaba nerviosa y tímida y fumando un cigarrillo tras otro, como

hacía habitualmente. En un momento, cuando se giró hacia la pizarra, confundió un trozo de tiza con un cigarrillo. Un joven teórico que estuvo en su conferencia encontró difícil tomársela en serio. ‘Podría aceptarla más seriamente si no los llamara siempre números mágicos’, se dijo a sí mismo. ‘Suenan a numerología *hocus pocus* [abracadabra]. ¿Por qué no números estables? Así se podrían tomar más seriamente’.”

Tras cuatro años de colaboración entre Goeppert Mayer y Jensen finalmente se completó el libro *Elementary Theory of Nuclear Shell Structure (Teoría elemental de la estructura nuclear de capas)*, que publicaron en 1955, en Nueva York, John Wiley & Sons, y en Londres, Chapman & Hall. El orden de los autores era María Goeppert Mayer (Argonne National Laboratory y University of Chicago) y J. Hans Jensen (Universität Heidelberg) y estaba dedicado “A nuestro crítico más paciente y constructivo, Joseph Edward Mayer”. El contenido estaba organizado en trece capítulos más cuatro apéndices, totalizando 269 páginas. Para los propósitos del presente libro, es suficiente citar parte de su prólogo, eminentemente pedagógico:

“En las últimas dos décadas la física nuclear ha crecido tan rápidamente que el hecho de que esta monografía concierna únicamente a un aspecto parcial de este diversificado campo puede no necesitar justificación.

Existen dos maneras de obtener una imagen constructiva de la estructura del núcleo atómico en física. Una es el estudio de las partículas elementales, sus propiedades e interacciones mutuas. Así se espera obtener un conocimiento fundamental de las fuerzas nucleares, a partir de las cuales se puede comprender deductivamente las complicadas estructuras nucleares. La otra manera consiste en lograr, mediante experimentación directa, tantos datos de diferentes núcleos individuales como sea posible, y examinar las relaciones entre estos datos. De esta forma se espera obtener una red de correlaciones y conexiones que indiquen algunas leyes elementales de la estructura nuclear. Estas dos vías aún no se han reunido para establecer una comprensión completa del núcleo, aunque se han encontrado muchas conexiones entre ellas.

El estado actual de la física nuclear es parecido al de los conceptos de la estructura de la materia *antes* de la formulación de la mecánica cuántica. En aquella época, la física de electrones y cuantos del campo electromagnético, por una parte, y los hechos y reglas de la química, por otra, no se habían unido en una imagen común. Un químico de aquel tiempo no podía esperar a que se completara la mecánica cuántica. Para orientarse desarrollaba un sistema de modelos que todavía retienen su propia importancia.

De la misma manera, el físico nuclear que sigue el segundo de los caminos mencionados anteriormente se ve obligado a emplear métodos útiles para mantenerse orientado en la cada vez mayor masa de información experimental. A este fin, sobre todo, está dedicado este libro. Además, algunos de los rasgos que

aparecen esperamos que sean de importancia fundamental para la teoría de las fuerzas nucleares elementales.

El recuerdo de la historia del desarrollo de la química quizás pueda eliminar el aspecto mágico del éxito que ha tenido el modelo de capas al correlacionar tantos hechos experimentales, y al hacer predicciones bastante precisas y seguras, aunque únicamente se utilizan suposiciones muy generales y cualitativas sobre las fuerzas nucleares. Confiamos, por consiguiente, que merece la pena reunir en una monografía gran parte del trabajo disperso que se ha realizado en los últimos años, en el que el modelo de capas ha ayudado a sistematizar los conocimientos experimentales y a profundizar en la estructura de núcleo”.

No hay duda de que el libro de Goeppert Mayer y Jensen ayudó a que el modelo de capas fuese conocido, aceptado y utilizado por los físicos nucleares. Una reseña que se publicó en la revista *Nuclear Physics* en 1956 (vol. 6, pp. 670-671), firmada únicamente con las iniciales L. R., hacía hincapié en este aspecto. Puesto que ayuda a entender tanto el contenido del libro como la reacción que suscitó, la reproduciré en su totalidad:

“Los dos físicos que independientemente reconocieron la importancia del acoplamiento espín-órbita para caracterizar los estados nucleónicos independientes, y así diseñar por primera vez un modelo de capas factible para la estructura nuclear, han unido fuerzas para analizar el rico campo que ha abierto su descubrimiento. La bien coordinada imagen de las propiedades del núcleo que proporciona el modelo se basa en datos suministrados por investigaciones altamente especializadas de la más diversa naturaleza. Ha sido, por consiguiente, una tarea obligada presentar los rasgos fundamentales del modelo y un resumen comprensivo de los resultados obtenidos hasta ahora, de manera que sea accesible a los físicos experimentales (que, como es bien sabido, suelen encontrar los argumentos matemáticos difíciles de seguir). En respuesta a esta necesidad, ya han aparecido varios excelentes artículos de revisión, pero el presente libro, con su tratamiento más extenso y completo, será bienvenido no solo como una guía útil para aquellos ya dedicados a la investigación en este vasto campo, sino de forma más general como una autoritaria introducción a él para todos aquellos que desean familiarizarse con uno de los principales problemas de la física nuclear. Incluso los más inclinados a la teoría encontrarán el libro extremadamente útil; después de todo, las técnicas teóricas que no se tratan en él son de tipo sencillo que puede encontrarse fácilmente, si se necesita, en los artículos originales (¡no estoy hablando, por supuesto, del grupo simpléctico, cuyos misterios requieren en cualquier caso de una exclusiva iniciación!).

La organización general del libro sigue un plan sencillo y cubre de modo extenso todo el campo. La exposición es clara y concisa, y bien ilustrada con ejemplos y diagramas. Estos últimos son en su mayor parte familiares por haber aparecido en los artículos publicados, lo que no quiere decir que proporcionen

Poco después de llegar a San Diego, María sufrió un derrame cerebral que aunque no la incapacitó sí disminuyó sus facultades, teniendo el resto de su vida continuos problemas de salud. Aun así, continuó dando clases y participando activamente en la presentación y desarrollo del modelo de capas.

siempre la mejor representación del punto que se discute. Hay una completa presentación en forma de tablas de los datos relevantes, que es muy útil; sin embargo, la inclusión de algunos gráficos más habría incrementado aún más la utilidad práctica del libro. Excelentes apéndices ofrecen en pocas palabras los principales conceptos y fórmulas, reunidos de manera muy conveniente para ser aplicados directamente.

Si analizamos ahora el tratamiento detallado de los diversos aspectos del tema, desafortunadamente no encontramos en todas las partes el mismo grado de excelencia. De lo que ciertamente carecen los autores en ocasiones no es de competencia o de juicio crítico, sino simplemente de información suficiente sobre los trabajos de otros. En el prefacio, ellos mismos confiesan una ‘selección arbitraria en este aspecto’, y de forma algo ligera ofrecen como excusa que su propósito es escribir una introducción y no una ‘compilación exhaustiva’. No habría nada que objetar a esto si no fuese porque a menudo ignoraran contribuciones realmente significativas a los mismos argumentos que presentan. Esto no es el resultado de una restricción cuidadosamente considerada, sino de una pura negligencia. Constituye un pequeño consuelo observar que semejante negligencia con respecto a trabajos ajenos es una actitud que no se limita a nuestros autores, sino que está extendida entre los físicos americanos. Las condiciones caóticas de publicación fuera de Estados Unidos sin duda tienen algo que ver con esta deplorable situación. ¿Es mucho esperar que la física nuclear pueda ayudar a restaurar algún equilibrio en la valoración y utilización de contribuciones valiosas al conjunto de la comunidad científica haciéndolas más fácilmente accesibles?”

Catedrática en la Universidad de California en San Diego

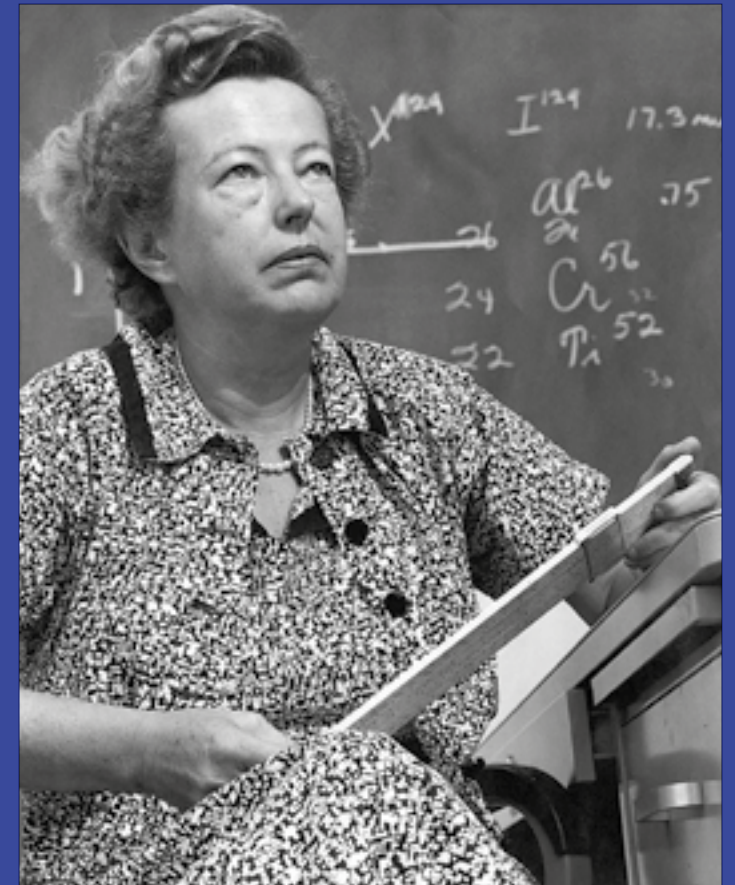
El 28 de noviembre de 1954 Enrico Fermi fallecía víctima de un cáncer de estómago. Su desaparición animó a algunos miembros del Instituto de Estudios Nucleares a abandonar Chicago. Teller se había ido antes, en 1952, y Urey lo hizo en 1958 a la Universidad de California, en su nuevo campus de San Diego. Al año siguiente – sin duda ayudados por la recomendación de Urey – María y Joseph



Joseph Mayer y María Goeppert Mayer durante una visita a Max Born, en Bad Pyrmont (Alemania), 1964



Con Werner Heisenberg y Eugene Wigner, Lindau, 1968



María Goeppert Mayer en la década de 1960



Placa en recuerdo de María Goeppert Mayer en Katowice, su ciudad natal

Mayer recibieron la oferta de sendas cátedras en esa universidad californiana. El grupo de científicos-amigos se reunía de nuevo. Y María obtenía por fin un puesto tan relevante y oficial como una cátedra. Un detalle significativo es que 24 horas después de conocer la oferta de la Universidad de California, la Universidad de Chicago “contraatacó” ofreciendo a María un puesto que le habían estado negando escudándose en las reglas antinepotismo, reglas que ahora ya no les parecían tan estrictas.

Poco antes de que los Mayer se trasladasen a San Diego, su hija Marianne, que no había querido ser científica, contrajo matrimonio con un astrofísico, Donat Wentzel, hijo de un viejo amigo de los Mayer, Gregor Wentzel (Donat había nacido en 1934, en Zúrich, donde su padre era profesor en la ETH). En aquella ocasión, María no escatimó esfuerzos para el éxito de la boda. Su otro hijo, Peter había comenzado a estudiar física, pero terminó cambiando a economía llegando a ser profesor de esta materia, dando lugar de este modo a la octava generación de profesores universitarios en la familia de María. Por su parte, Marianne ni quiso, ni necesitó, obtener un empleo. Se dedicó plenamente a su familia.

Desgraciadamente, poco después de llegar a San Diego, María sufrió un derrame cerebral que aunque no la incapacitó sí disminuyó sus facultades, teniendo el resto de su vida continuos problemas de salud. Aun así, continuó dando clases y participando activamente en la presentación y desarrollo del modelo de capas. La disminución de su actividad científica se puede estimar simplemente teniendo en cuenta que a partir de 1959, el año en que se incorporó a la Universidad de California, únicamente publicó los siguientes trabajos: “Harmonic oscillator wave function in nuclear spectroscopy”. *Physical Review* 117, 174-84 (1960) (con R. D. Lawson), y la que fue su última publicación, una revisión (*review*) del modelo de capas, escrito en colaboración con Hans Jensen: “The shell model. I. Shell closure and jj coupling” en *Alpha-, Beta- and Gamma-Ray Spectroscopy*, Kai Siegbahn, ed. (North Holland, Ámsterdam, 1965), p. 557. A los que se puede añadir su conferencia Nobel, *The Shell model*, que se publicó en tres lugares, dos en inglés y una en alemán, en 1964: *Science* 145, 999-1006; *Les Prix Nobel en 1963 (The Nobel Foundation, Estocolmo)*, y “Das Schalenmodell des Atomkerns”, *Angewandte Chemie, Jahrgang*, 76 (7), 729-37.

Antes, entre 1951 y 1958, y dejando al margen el libro ya citado que escribió con Jensen, sus publicaciones habían sido las siguientes: un artículo de alta divulgación en *Scientific American* (marzo de 1951), “The structure of the nucleus: Nuclear shell structure and beta decay”, *Reviews of Modern Physics* 23, 315-21 (1951), con S. A. Moszkowski y L. W. Nordheim; “Report on a Monte Carlo calculation performed on the ENIAC”, U.S. *Department of Commerce, Applied Mathematics*, Ser. 12, 19-20 (1951); “Electromagnetic effects due to spin-orbit coupling”, *Physical Review* 85, 1059 (1952), con J. H. Jensen; “Radioactivity and nuclear theory”, *Annual Reviews of Physical Chemistry*, 3, 19-38 (1953); una re-

La mitad del premio Nobel fue para Eugene Wigner “por sus contribuciones a la teoría del núcleo atómico y las partículas elementales, particularmente a través del descubrimiento y aplicación de principios de simetría fundamental”, y la otra mitad fue compartida por María Goeppert Mayer y Hans Jensen “por sus descubrimientos relativos a la estructura de capas nuclear”.

vision (*review*) sobre el modelo de capas publicado en los *Proceedings of the International Conference of Theoretical Physics, Tokyo* (Science Council of Japan, 1954), pp. 345-355; “Classification of beta transitions,” en *Beta and Gamma Ray Spectroscopy*, capítulo 16.1 (North Holland, Ámsterdam, 1955); “Twin neutrino theory. A modified 2 component theory”, *Physical Review* 107, 1445-47 (1957), con V. L. Telegdi; y “Statistical theory of asymmetric fission, Part VII”, en *Proceedings of the International Symposium on Transport Processes in Statistical Mechanics, Brussels (Interscience Publishers, Nueva York, 1958)*, pp. 187-191.

El Premio Nobel

María Goeppert Mayer fue nominada en 26 ocasiones y propuesta durante ocho años para el Premio Nobel de Física y una vez para el de Química. En 1955 por Max Born y J. van Staveren. En 1956 por E. Justi, M. Koler, Harold Urey, Karl Johann Freudenberg, G. Rathenau y James Franck. En 1957 por James Franck y Karl Johann Freudenberg. En 1958 por James Franck y Eugene Wigner. En 1959 por Karl Johann Freudenberg y Max Born. En 1960 por B. Flowers, Emilio Segrè, Harold Urey y Karl Johann Freudenberg. En 1962 por James Franck, M. Kohler, Willard Libby, Heinz Maier-Leibnitz, Torsten Gustafson y Lamek Hulthén. Y en 1963, el año que lo recibió, por Amos de Shalit y Torsten Gustafson. En 1958 había sido propuesta para el Premio Nobel de Química por Willis Eugene Lamb.

Por su parte, Hans Jensen recibió 29 nominaciones y fue propuesto durante nueve años. En 1955 por Max Born. En 1956 por E. Justi, M. Koler, Harold Urey, Karl Johann Freudenberg, G. Rathenau y James Franck. En 1957 por James Franck y Karl Johann Freudenberg. En 1958 por James Franck y Eugene Wigner. En 1959 por Karl Johann Freudenberg y Max Born. En 1960 por B. Flowers, Emilio Segrè, Harold Urey y Karl Johann Freudenberg. En 1961 por Karl Johann Freudenberg. En 1962 por Karl Johann Freudenberg, James Franck, M. Kohler, Willard Libby, Heinz Maier-Leibnitz, Torsten Gustafson y Lamek Hulthén. Y en 1963, el año que lo recibió, por Karl Johann Freudenberg, Amos de Shalit y

Torsten Gustafson. En 1958 había sido propuesto para el Premio Nobel de Química por Willis Eugene Lamb.

Curiosamente, Eugene Wigner, que recibió la mitad del premio, había sido propuesto menos veces, 24.

Finalmente fue en 1963 cuando los tres lo recibieron. Como ya he apuntado, la mitad del premio fue para Eugene Wigner “por sus contribuciones a la teoría del núcleo atómico y las partículas elementales, particularmente a través del descubrimiento y aplicación de principios de simetría fundamental”, y la otra mitad fue compartida por María Goeppert Mayer y Hans Jensen “por sus descubrimientos relativos a la estructura de capas nuclear”.

La conferencia Nobel de Wigner se tituló *Events, laws of nature, and invariance principles*, la de Goeppert Mayer, *The shell model* y la de Jensen *Glimpses at the history of nuclear structure theory*.

María Goeppert Mayer no fue la primera mujer en obtener un Premio Nobel en ciencia (Física, Química o Medicina-Fisiología) después de que Marie Curie recibiese los de Física (1903) y Química (1911). Antes que ella lo habían ganado Irène Joliot-Curie (Química, 1935), una de las dos hijas de Marie; y Gerty Cori (Medicina-Fisiología, 1947). Ambas, por cierto, lo compartieron con sus esposos, Frédéric y Carl Ferdinand, respectivamente (en el caso de los Cori lo compartieron con el fisiólogo argentino Bernardo Houssay). Y el año siguiente al de María Goeppert, Dorothy Crowfoot Hodgkin ganó el Nobel de Química por haber determinado, utilizando técnicas de difracción de rayos X, “las estructuras de importantes sustancias bioquímicas”. No es irrelevante señalar, por lo que significa acerca de la capacidad de las mujeres (si eran capaces de destacar en otros campos ¿por qué no en ciencia?), que antes de que Goeppert Mayer recibiese el Premio Nobel de Física, habían obtenido el de la Paz, Bertha von Suttner (1905), Jane Addams (1931) y Emily Greene Balch (1946), y el de Literatura, Selma Lagerlöf (1909), Grazia Deledda (1926), Sigrid Undset (1928), Pearl S. Buck (1938) y Gabriela Mistral (1945).

Un detalle interesante – que ha recalcado Margaret Rossiter – es que María Goeppert fue objeto de mucha más atención, tras recibir el Premio Nobel, que lo fue Gerty Cori, quien casi pasó desapercibida. La prensa local y nacional estadounidense comparó a María Goeppert con Marie Curie, pero además se ocuparon bastante de su vida familiar, algo que era poco habitual en los casos de los premios Nobel masculinos. *Science Digest*, por ejemplo, titulaba uno de sus artículos “En casa con María Mayer”, en el que hacía hincapié en su belleza en los tiempos de Göttinga y en que su marido manifestaba lo buena ama de casa que era. Una revista femenina, *McCall's*, resaltaba varias veces que era una anfitriona elegante y describía con detalle el vestido que iba a llevar en la ceremonia de entrega del Premio Nobel. Y el *San Diego Evening Tribune* encabezaba la noticia con “Madre gana el Premio Nobel de Física”. Que fuera una física distinguida, catedrática de

Su recuerdo, ha sobrevivido al paso del tiempo. Después de su muerte, la American Physical Society creó un premio con su nombre para jóvenes físicas con un doctorado que estén al comienzo de sus carreras. Asimismo, el Argonne National Laboratory y la Universidad de California en San Diego, la recuerdan. El primero con un premio anual a una científica o ingeniera joven sobresaliente, y el segundo albergando un simposio anual, el “María Goeppert Mayer Symposium”.

la Universidad de California en San Diego era menos importante que ser buena ama de casa.

Desde que María Goeppert Mayer recibiera el Premio Nobel de Física, únicamente otras dos mujeres lo han obtenido: la canadiense Donna Strickland, profesora de la Universidad de Waterloo, que lo compartió en 2018 con Gérard Mourou y Arthur Ashkin “por su método de generar pulsos ópticos ultracortos de alta intensidad”, y Andrea Ghez, que lo consiguió en 2020 junto a Reinhard Genzel “por el descubrimiento de un objeto compacto supermasivo en el centro de nuestra galaxia”, y Roger Penrose, éste “por el descubrimiento de que la formación de agujeros negros es una predicción robusta de la teoría general de la relatividad”.

Fallecimiento

Las fotografías que existen del momento en que María Goeppert Mayer recibió el Premio Nobel muestran con claridad su deterioro físico, que se había ido agravando con algunos ataques cardíacos. Falleció el 20 de febrero de 1972. Joseph Mayer se volvió a casar pronto (con Margaret Griffen, que no era científica). Vivió once años más. Murió en 1983.

Su recuerdo, sin embargo, ha sobrevivido al paso del tiempo. Después de su muerte, la American Physical Society creó un premio con su nombre para jóvenes físicas con un doctorado que estén al comienzo de sus carreras. La premiada recibe dinero y la oportunidad de pronunciar conferencias invitadas sobre su investigación en cuatro instituciones importantes. Asimismo, dos de los centros con los que estuvo vinculada, el Argonne National Laboratory y la Universidad de California en San Diego, la recuerdan. El primero con un premio anual a una científica o ingeniera joven sobresaliente, y el segundo albergando un simposio anual, el “María Goeppert Mayer Symposium” que reúne a investigadoras para

tratar de cuestiones actuales de la ciencia. Un cráter de Venus, de un diámetro de 35 kilómetros, lleva su nombre. Y en 2011 fue honrada con un sello de Servicio Postal de Estados Unidos.

Mereció, merece, estos homenajes y recuerdos. He tratado de mostrar en este libro que su carrera científica no fue fácil, que su “condición” no le permitió establecer y desarrollar un programa de investigación propio, coherente, de esos que ocupan una vida. Tuvo que ir a remolque, adecuarse a lo que los centros en los que su esposo profesaba le facilitaban, desde luego no muy generosamente. Y en todas las ocasiones brilló, dejó huella. Fue, no hay ninguna duda de ello, una gran científica.



Bibliografía

Estudios biográficos sobre María Goeppert Mayer

JOAN DASH, *A Life of One's Own. Three Gifted Women and the Men They Married* (Harper & Row, Nueva York, 1973).

JOSEPH P. FERRY, *María Goeppert Mayer. Physicist* (Chelsea House Publishers, Filadelfia, 2003).

ULLA FÖLSING, *Mujeres Premio Nobel* (Alianza Editorial, Madrid, 1993).

KAREN E. JOHNSON, "Science at the Breakfast Table", *Physics in Perspective* 1, 22-34 (1999).

PETER C. MAYER, *Son of (Entropy)². Personal Memoirs of a Son of a Chemist, Joseph E. Mayer, and a Nobel Prize Winning Physicist, María Goeppert Mayer* (AuthorHouse, Bloomington, 2011).

ROBERT G. SACHS, "María Goeppert Mayer, 1906-1972", *Biographical Memoirs National Academy of Sciences* 50, 310-328 (1979).

EUGENE WIGNER, "Obituary: María Goeppert Mayer", *Physics Today* 25 (mayo de 1972), pp. 77-79.

Capítulo 1

MAX Y HEDWIG BORN, *Ciencia y conciencia en la era atómica* (Alianza Editorial, Madrid, 1971).

MAX BORN, *My Life. Recollections of a Nobel Laureate* (Charles Scribner's Sons, Nueva York, 1978).

WERNER HEISENBERG, *Encuentros y conversaciones con Einstein y otros ensayos* (Alianza, Madrid, 1985); *Diálogos sobre la física atómica*, en José Manuel Sánchez Ron, dir. (1996), *Heisenberg-Bohr-Schrödinger. Física cuántica* (Círculo de Lectores, Barcelona, 1996).

ROBERT S. MULLIKEN, *Life of a Scientists* (Springer-Verlag, Berlín, 1968).

MAX PLANCK, *Autobiografía científica y otros escritos* (Nivola, Madrid, 2000).

JOSÉ MANUEL SÁNCHEZ RON, *Historia de la física cuántica, I. El período fundacional (1860-1926)* (Crítica, Barcelona, 2001).

Capítulo 2

EDOARDO AMALDI, *The Adventurous Life of Friedrich Georg Houtermans, Physicist (1903-1966)* (Springer, Heidelberg, 2012).

MAX BORN, *My Life. Recollections of a Nobel Laureate* (Charles Scribner's Sons, Nueva York, 1978).

AUGUSTE DICK, *Emmy Noether, 1882-1935* (Birkhäuser, Boston, 1981).

WALTER M. ELSASSER (Science History Publications, Nueva York, 1978).

NANCY THORNDIKE GREENSPAN, *The End of a Certain World. The Life and Science of Max Born* (Basic Books, Nueva York, 2005).

FELIX KLEIN, *Lecciones sobre el desarrollo de la Matemática en el siglo XIX* (Crítica, Barcelona, 2006).

JOST LEMMERICH, *Science and Conscience. The Life of James Franck* (Stanford University Press, Stanford, 2011).

MARIE-ANN MAUSHART, *Hertha Spöner. A Woman's Life as a Physicist in the 20th Century* (Department of Physics, Duke University, Durham, North Carolina, 2011).

CONSTANCE REID, *Hilbert* (Springer-Verlag, 1970).

MARGARET W. ROSSITER, *Women Scientists in America. Struggles and Strategies to 1940* (The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1982).

DAVID E. ROWE, *A Richer Picture of Mathematics. The Göttingen Tradition and Beyond* (Springer, 2018).

ARNE SCHIRRMACHER, *Establishing Quantum Physics in Göttingen. David Hilbert, Max Born, and Peter Debye in Context, 1900-1926* (Springer, 2019).

M. SHIFMAN, *Standing Together in Troubled Times* (World Scientific, Singapur, 2017).

BRIGITTE STROHMAIER y ROBERT ROSNER, *Marietta Blau. Stars of Disintegration. Biography of a Pioneer of Particle Physics* (Ariadne Press, Riverside, Ca., 2006).

VICTOR WEISSKOPF, *The Joy of Insight. Passions of a Physicist* (BasicBooks, Nueva York, 1991).

HERMANN WEYL, "Emmy Noether", *Scripta Mathematica* 3, 201-220 (1935).

RICHARD WILLSTÄTTER, *From My Life* (W. A. Benjamin, Nueva York, 1965).

The Collected Papers of Albert Einstein, vol. 8, parte B ("The Berlin Years: Correspondance 1918"), Schulmann, Robert, Kox, Anne J., Janssen, Michel e Illy, József, eds. (Princeton University Press, Princeton, 1998).

Capítulo 3

PHINA G. ABIR-AM y DORINDA OUTRAM, eds., *Uneasy Careers ad Intimate Lives. Women in Science, 1789-1979* (Rutgers University Press, New Brunswick, 1987).

MAX BORN, *My Life. Recollections of a Nobel Laureate* (Charles Scribner's Sons, Nueva York, 1978).

MAX BORN, *The Born-Einstein Letters, 1916-1955* (Macmillan, Nueva York, 2005).

A. HUNTER DUPREE, *Science in the Federal Government* (The Johns Hopkins University Press, Baltimore 1986; primera edición 1957).

D. FLEMING y B. BAILYN, eds., *The Intellectual Migration* (Harvard University Press, Cambridge, Mass. 1969).

DANIEL KEVLES, *The Physicists. The History of A Scientific Community in Modern America* (Alfred A. Knopf, Nueva York, 1978).

KATHERINE HARAMUNDANIS, ed., *Cecilia Payne-Gaposchkin: Her Autobiography and Other Recollections* (Cambridge University Press, Nueva York 1984).

SALVADOR LURIA, *Autobiografía de un hombre de ciencia* (Fondo de Cultura Económica, México, 1986).

C. MEAD y T. HAGER, eds. (2001), *Linus Pauling, Scientist and Peacemaker* (Oregon State University Press, Covallis, 2001).

SIMON NEWCOMB, "The evolution of the scientific investigator", en *Congress of Arts and Science. Universal Exposition, St. Louis, 1904*, Howard J. Rogers, ed. (Houghton, Mifflin and Co., Boston, 1905), vol. 1; reproducido en *Physics for a New Century*, Katherine R. Sopka, comp. (American Institute of Physics, Nueva York, 1986).

LINUS PAULING, *The Nature of the Chemical Bond and the Structure of Molecules and Crystals* (Cornell University Press, Ithaca, 1939).

NATHAN REINGOLD, ed. *Science in Nineteenth-century America. A Documentary History* (MacMillan, Londres, 1966).

MARGARET W. ROSSITER, *Women Scientists in America. Struggles and Strategies to 1940* (The Johns Hopkins University Press, Baltimore 1982) y *Women Scientists in America. Before Affirmative Action, 1940-1972* (The Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1995).

JOSÉ MANUEL SÁNCHEZ RON, *El poder de la ciencia. Historia social, política y económica de la ciencia (siglos XIX y XX)* (Crítica, Barcelona, 2007; segunda edición 2010).

DAVA SOBEL, *The Glass Universe. How the Ladies of the Harvard Observatory took the Measure of the Stars* (Viking, Nueva York, 2016).

KATHERINE RUSSELL SOPKA, *Quantum Physics in America* (Arno Press, Nueva York, 1980). Roger H. Stuewer, “Nuclear physicists in a new world. The émigrés of the 1930s in America”, *BerWissenschaftsgesch* 7, 23-40 (1984).

Capítulo 4

HANS A. BETHE, ROBERT F. BACHER y M. STANLEY LIVINGSTON, *Basic Bethe. Seminal Articles on Nuclear Physics, 1936-1937* (Tomash Publishers-American Institute of Physics, 1986).

LAURA FERMI, *Atoms in the Family. My Life with Enrico Fermi* (The University of Chicago Press, Chicago, 1954). Otto R. Frisch, *Del átomo a la bomba de hidrógeno. Recuerdos de un físico nuclear* (Alianza Editorial, Madrid, 1982).

KAREN E. JOHNSON, “María Goeppert Mayer: Atoms, molecules and nuclear shells”, *Physics Today* 39, 44-49 (septiembre 1986).

JOSEPH MAYER, “The way it was”, *Annual Review of Chemical Physics* 33, 1-23 (1982).

LÉON ROSENFELD, “Nuclear reminiscences”, en *Cosmology, Fusion and Other Matters: George Gamow Memorial Volume*, Frederick Reines ed. (Colorado Associated Universities Press, Colorado, 1972).

JOSÉ MANUEL SÁNCHEZ RON, *El poder de la ciencia. Historia social, política y económica de la ciencia (siglos XIX y XX)* (Crítica, Barcelona, 2007; segunda edición 2010).

ROBERT SERBER, *The Los Alamos Primer. The First Lectures on How to Build an Atomic Bomb* (University of California Press, Berkeley, 1992).

MATTHEW SHINDELL, *The Life and Science of Harold C. Urey* (The University of Chicago Press, Chicago, 2019).

ALICE K. SMITH y CHARLES WEINER, eds., *Robert Oppenheimer. Letters and Recollections* (Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1980).

ROGER STUEWER, ed., *Nuclear Physics in Retrospect. Proceedings of a Symposium on the 1930s* (University of Minnesota Press, Minneapolis, 1979).

LEO SZILARD, “Reminiscences”, en *The Intellectual Migration. Europe and America, 1930-1960* (Harvard University Press, Cambridge, Mass. 1969).

EDWARD TELLER, con JUDITH SHOOLERY, *Memoirs. A Twentieth-Century Journey in Science and Politics* (Perseus Publishing, Cambridge, Mass., 2001).

Capítulo 5

WALTER M. ELSASSER, *Memoirs of a Physicist in the Atomic Age* (Science History Publications, Nueva York, 1978).

GEORGE GAMOW, *My World Line. An Informal Autobiography* (The Viking Press, Nueva York, 1970).

GEORGE GAMOW y C. L. CRITCHFIELD, *Theory of Atomic Nucleus and Nuclear Energy Sources* (Clarendon Press, Oxford, 1949).

MARÍA GOEPPERT MAYER y J. HANS D. JENSEN, *Elementary Theory of Nuclear Shell Structure* (John Wiley & Sons, Nueva York, 1955).

RICHARD G. HEWLETT y FRANCIS DUNCAN, *Atomic Shield. A History of the United States Atomic Energy Commission*, vol. II (“1947-1952”) (University of California Press, Berkeley, 1990).

KAREN E. JOHNSON, “María Goeppert Mayer: Atoms, molecules and nuclear shells”, *Physics Today* 39, 44-49 (septiembre 1986).

KAREN E. JOHNSON, “From natural history to the nuclear shell model: chemical thinking in the work of Mayer, Haxel, Jensen, and Suess”, *Physics in Perspective* 6, 295-309 (2004).

HELGE KRAGH, *Cosmology and Controversy* (Princeton University Press, Princeton, 1996).

HELGE KRAGH “An unlikely connection: Geochemistry and Nuclear Structure”, *Physics in Perspective* 2, 381-397 (2000).

MARGARET W. ROSSITER, *Women Scientists in America. Struggles and Strategies to 1940* (The Johns Hopkins University Press, Baltimore 1982).

ANDREI SAJAROV (*Memorias* [Plaza & Janes/Cambio 16, Barcelona, 1991]).

EDWARD TELLER, “Back to the laboratories”, *Bulletin of the Atomic Scientists* 6, 71-72 (1950).

