

## Maria Goeppert Mayer

por **Jesús Navarro\***

*Recibió el premio Nobel de Física de 1963 por “sus descubrimientos referentes a la estructura nuclear de capas”. Fue la segunda mujer en obtener el premio Nobel de Física y la cuarta en una categoría científica. Sin embargo, fuera de la Física Nuclear su nombre no es muy conocido e incluso entre los físicos nucleares se sabe poco sobre su vida y sus trabajos. De formación matemática inicial, hizo aportaciones relevantes en campos tan diversos como química física, física química, estado sólido y física nuclear.*

Las ideas del doctor Goeppert sobre la educación de los hijos no eran muy usuales para su época. Este pediatra solía decir que las madres son el “enemigo natural” de sus hijos, pues tienden a sobreprotegerlos, inhiben sus iniciativas y evitan que se enfrenten por sí mismos a situaciones de riesgo. Educó en estas ideas a su única hija, nacida el 28 de junio de 1906 en Kattowitz (la actual Katowice polaca), en quien estimuló la curiosidad por los fenómenos naturales y el deseo de conocimiento científico. Le decía que no fuera sólo una mujer, en el sentido de que no se limitara a ser un ama de casa, sino que ejerciera una profesión y abriera sus horizontes intelectuales. La madre, quien al casarse había dejado la enseñanza de francés y piano, proporcionó a la hija la educación que correspondía al nivel social de la familia.

En 1910 el padre obtuvo la cátedra de pediatría de la universidad de Gotinga y la familia se trasladó a esta pequeña ciudad. La universidad estaba en la cumbre de su apogeo, sobre todo en el campo de las matemáticas, con profesores como Félix Klein, David Hilbert o Richard Courant. Los Goeppert eran vecinos de los Hilbert, de quienes se hicieron buenos amigos. Tal vez todo ello influyera para que Maria se sintiera muy pronto atraída por las matemáticas. Estaba fuera de duda que iría a la universidad.

La educación para las chicas solía acabar a los 14-15 años. Aunque las universidades alemanas ya admitían a

mujeres en las aulas, en Gotinga no había centros públicos donde las mujeres pudieran seguir los tres cursos previos al examen de acceso a la universidad. Maria ingresó en el *Frauenstudium*, un centro privado creado con esta finalidad por sufragistas. Pero al acabar el primer curso el centro cerró por problemas económicos debidos a la inflación galopante de aquel momento. Recibió clases particulares de algunos profesores del centro durante un año más, y superó el duro examen de acceso a los 17 años, cuando lo usual era hacerlo a partir de los 18. En 1924 fue admitida en la universidad de Gotinga para estudiar matemáticas.

### La mecánica cuántica en Gotinga

En 1920 llegaron a Gotinga Max Born y James Franck como catedráticos de física teórica y de física experimental, respectivamente. Gotinga iba a convertirse en centro de referencia de la nueva física atómica. Recordemos que en 1914 Franck realizó con Gustav Hertz el famoso experimento que demostraba la existencia de estados discretos de energía en el átomo, lo que les valió el premio Nobel de Física de 1925. Born organizó en 1922 un encuentro con Niels Bohr al que acudió un gran número de científicos alemanes. Este “Festival Bohr”, como fue conocido, rompió el aislamiento al que estaban sometidos los científicos alemanes después de la Primera Guerra Mundial. Durante dos semanas Bohr presentó el estado actual de la física atómica y los problemas abiertos de lo que más tarde se llamó la “vieja teoría cuántica”. La nueva no

iba a tardar en aparecer: el artículo seminal de Werner Heisenberg sobre la mecánica cuántica fue publicado en septiembre de 1925. Dos meses después se publicó el importante artículo de Born, Heisenberg y Jordan en el que sentaban las bases de la mecánica cuántica en su versión matricial. A lo largo de 1926, desde Zúrich, Erwin Schrödinger publicó una serie de artículos con su versión ondulatoria, demostrando su equivalencia con la versión matricial.

Born logró que Gotinga se convirtiera en lugar obligado para quien quisiera aprender mecánica cuántica. En su seminario los estudiantes tenían que leer y comentar artículos, resolver problemas y otras actividades, bajo la supervisión de Born y de sus ayudantes. Constantemente se hablaba de los temas de física que interesaban entonces, todo ello en un ambiente muy informal. Una discusión sobre física atómica iniciada en el seminario podía proseguir de manera más informal dando un paseo por las colinas vecinas y acabar cenando en alguna taberna.

Las familias Goeppert y Born tenían muy buenas relaciones, y un buen día Max Born sugirió a Maria que acudiera a su seminario. A Maria le gustó tanto aquello que decidió dejar las matemáticas por la física. Decía que tanto la física como las matemáticas resuelven rompecabezas, que es lo que a ella le gustaba hacer. Pero los matemáticos buscan los rompecabezas en sus mentes, mientras que los físicos los buscan en la naturaleza, cosa que le gustaba más. En cierto modo siguió los pasos de Born, quien de matemático de formación se

\* IFIC (CSIC y Universidad de Valencia).

Firma de Maria  
Goeppert Mayer.

transformó en físico teórico, motivado en este caso por Hilbert.

Con el cambio, Maria tuvo que estudiar a marchas forzadas toda la física que no había visto antes. En el seminario de Born aprendió mecánica cuántica y sus aplicaciones a diversos problemas, según lo que se publicaba en las revistas científicas. Curiosamente, a pesar de que fue Born quien dio la interpretación física de la función de ondas de Schrödinger, en su curso solo enseñaba la versión matricial. En una entrevista con el conocido historiador de la ciencia Thomas Kuhn<sup>1</sup>, Maria le dijo que aprendió la mecánica ondulatoria durante una prolongada ausencia de Born, cuando fue reemplazado por su ayudante Walter Heitler.

En 1927 murió Friedrich Goeppert. Maria se propuso acabar sus estudios y hacer una tesis. Con una beca del gobierno alemán pasó un semestre en la universidad de Cambridge, donde estaba Ernest Rutherford. A su regreso, pensó que tal vez podría convertirse en la séptima generación de profesores de universidad en la familia. No era algo fácil. Sólo dos mujeres daban entonces clases en Gotinga: Emmy Noether, ayudante de Hilbert, y Hertha Sponer, ayudante de Frank. Ambas tenían un estatus no oficial, pero a pesar de su largo título “*nichtbeamteter ausserordentlicher Professor*”, recibían sólo un salario simbólico por su trabajo. Maria no podía imaginar que su futuro tendría mucho en común con la situación de estas dos mujeres.

La muerte del padre trastocó la economía familiar. La madre tuvo que alquilar algunas habitaciones de la casa a visitantes de la universidad. Uno de estos huéspedes fue Joseph Mayer, un químico estadounidense que había hecho su tesis en Berkeley con Gilbert Lewis. Llegó a finales de 1928 para hacer una estancia postdoctoral con Franck. Joe, como era conocido por todos, era un tipo alto, listo, sociable, divertido y sobre todo muy discutiador. Un amigo le había recomendado hospedarse en casa de los Goeppert, porque era muy confortable y porque en ella vivía “la chica más guapa de la ciudad”.

Maria había empezado a trabajar en su tesis sobre la teoría de la radiación de Dirac. Al cabo de algunos meses, Maria y Joe empezaron a pasar mucho tiempo juntos. Hacían excursiones a la montaña, esquaban, jugaban al tenis, iban a bailar casi todas las noches... Cuando Frau Goeppert entendió la situación le dijo a su hija que era mejor que se casaran, pues de lo contrario nunca acabaría su tesis. De hecho, este fue el empujón

que necesitaba Maria para resolver sus dudas sentimentales. Joe estaba encantado de casarse con una mujer científica y siempre apoyó a Maria para que se dedicara a la investigación, a pesar de las dificultades que, como veremos, encontró más tarde. Se casaron en enero de 1930 y, siguiendo la costumbre de tantos países, cambió de identidad pasando a llamarse Maria Mayer. Pero raramente firmó sus trabajos con este nombre, y lo hizo más a menudo como Maria G. Mayer o Maria Goeppert Mayer. En lo que sigue, nos referiremos a Maria y Joe, sin especificar el apellido.

Como requisito previo a la presentación de la tesis, de la que hablaremos más adelante, tuvo que pasar el examen *rigorosum*. Era una especie de reválida sobre los conocimientos generales del candidato y, como indica su nombre, no era cosa fácil. Algunos compañeros de Maria no lo lograron a la primera, y Maria temía correr la misma suerte. Pero no fue así y al acabar se encontró con que Joe ya había organizado una fiesta para celebrarlo, con muchos de los compañeros de Maria, porque en ningún momento había dudado del resultado. En marzo de 1930 los Mayer se trasladaron a los Estados Unidos, donde residieron el resto de sus vidas.

### Una química en Baltimore

Joe había aceptado una oferta de la universidad Johns Hopkins, de Baltimore, como profesor asistente de Química. Maria necesitó un tiempo para acostumbrarse al nuevo país. Echaba de menos a su madre, su familia, amigos, ciudad... Escribía a su madre todas las semanas, contándole todos los detalles de su vida cotidiana, ocultando el tipo de dificultades a que se enfrentaba. Le escribía: “Es terrible, pero cuanto más lejos está uno de Alemania, más patriota se vuelve”. Si su madre tardaba en contestar, le enviaba un telegrama con respuesta pagada. Hasta la muerte de su madre, ocurrida en 1937, los Mayer la visitaron todos los veranos.

Tal vez pensaron que para Maria sería fácil encontrar un puesto, pero las instituciones estadounidenses, tanto estatales como privadas, aplicaban una estricta ley antinepotismo, herencia de la gran depresión, según la cual dos miembros de una misma familia no podían ser empleados en la misma institución. En la práctica, esta restricción afectaba siempre a las mujeres casadas. El único trabajo que la Hopkins ofreció a Maria fue ayudar ocasionalmente en la correspondencia en alemán, recibiendo un salario simbólico por ello. Por suerte para Maria, en el departamento de Física estaba desde 1926 el austriaco Karl Hertzfeld, conocido por sus trabajos sobre teoría cinética y mecánica estadística. En aquellos años, la mecánica cuántica no estaba muy difundida en los Estados Unidos y, aprovechando los conocimientos de Maria, le propuso colaborar en cuestiones de estructura atómica y molecular. Hertzfeld logró así que Maria accediera a las instalaciones de la universidad, dispusiera de una mesa de trabajo,

<sup>1</sup> T. S. Kuhn: Interview of Maria Goeppert Mayer, 1962 February 20. Niels Bohr Library & Archives, AIP, [www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4770](http://www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/4770).

asistiera a las actividades del departamento e incluso, al cabo de unos años, que también impartiera algunos cursos. Se convirtió en un miembro informal del departamento, que trabajaba *gratis et amore*, una situación que se mantuvo durante muchos años. Esta relación informal le permitía poner en sus artículos la afiliación genérica Johns Hopkins University.

Durante nueve años Maria trabajó fundamentalmente en problemas relacionados con física química y química física. Con Herzfeld publicó varios artículos sobre temas como los estados de agregación, la teoría de fusión de cristales o el comportamiento del hidrógeno disuelto en paladio. También colaboró con Joe, a quien tuvo que dar clases particulares de mecánica cuántica. De hecho, Joe se acercó cada vez más a la física, hasta el punto de ser nombrado presidente de la American Physical Society entre 1973 y 1975. Siempre dijo que “toda la mecánica cuántica que sé la aprendí con ella”. Por su parte, Maria reconoció años después que gracias a Joe aprendió a apreciar los datos experimentales y a observar en ellos regularidades, aunque no dispusiera una teoría para explicarlos. Maria y Joe publicaron juntos sólo dos artículos. En ellos analizaban datos espectrales de diversos compuestos y aplicaban la mecánica cuántica para deducir propiedades como la entropía de moléculas poliatómicas o la polarizabilidad de iones. Esta aproximación a la química le permitió ampliar su manera de abordar los problemas, añadiendo una visión más empírica a su tendencia matemática. En retrospectiva, podemos decir que fue importante para sus trabajos posteriores en física nuclear.

En 1932 Maria se quedó embarazada. Decidió tomar la nacionalidad estadounidense, para que sus hijos nacieran en los Estados Unidos de padre y madre estadounidenses. Su hija Maria Anne nació en la primavera de 1933 y durante un año Maria se quedó en casa para ocuparse de ella. Naturalmente, esta “conciliación” no suponía ningún problema para una mujer que trabajaba voluntariamente y sin sueldo.

La llegada de los nazis al poder en 1933 supuso la llegada a Estados Unidos de muchos científicos centroeuropeos, en su mayoría judíos. Uno de ellos fue Edward Teller, contratado por la universidad George Washington, que visitaba frecuentemente la cercana Baltimore. Era amigo de los Mayer desde que pasó un año en Gotinga y, como veremos más tarde, colaboró con Maria en diversos proyectos. En Teller, de imaginación fértil, encontró Maria un mentor para aprender los desarrollos recientes de la física teórica.

Maria impartió materias como mecánica estadística, estadísticas cuánticas o mecánica clásica, pero recibía solo unos 200 dólares anuales por su asistencia como traductora de alemán. A pesar de su situación no oficial, también dirigió una tesis doctoral. En la breve biografía que George Sachs

escribió sobre Maria cuenta que cuando fue a pedirle un tema de tesis en física teórica, ésta le dijo que los temas novedosos estaban en física nuclear. Sin embargo, como reconoció no ser experta en el campo, fueron a hablar con Teller para encontrar un tema adecuado. La tesis de Sachs estaba dedicada a los momentos magnéticos nucleares. Como recordó Sachs, Maria le orientó en todo el trabajo de la tesis, sugiriendo las técnicas más adecuadas de la mecánica cuántica a los problemas de física nuclear.

El trabajo científico realizado en la Hopkins por el que fue más conocida fue resultado de la colaboración con Alfred Sklar, un estudiante de Herzfeld. Sklar pretendía relacionar las propiedades ópticas de una molécula con su estructura. Para ello tenía que construir orbitales moleculares, que son combinaciones lineales de orbitales de los átomos constituyentes. Un problema que puede parecer sencillo hoy en día, pero que no lo era ciertamente en la década de 1930, y por ello Herzfeld sugirió a Sklar que recurriera a Maria. El artículo que publicaron sobre el espectro del benceno fue uno de los primeros cálculos teóricos de los niveles de energía de una molécula a partir de primeros principios, utilizando como único parámetro empírico la distancia entre dos átomos de carbono en el benceno. Este artículo se convirtió en modelo para otros cálculos análogos. Por este trabajo y por las colaboraciones con Herzfeld y Joe, se ganó la fama de ser una buena química.

Su segundo hijo, Peter Conrad, nació en 1938. Decidió dejar de dar clases durante el embarazo y dedicar el tiempo a escribir con Joe un libro sobre mecánica estadística. Como estaría basado en los cursos que ya habían dado en la Hopkins, pensaban que sería algo rápido, pero tardaron más de dos años en acabarlo. Mientras tanto, la universidad pasaba por una mala situación económica y buscaba reducir gastos de cualquier manera. Joe se enteró de que su contrato se iba a acabar pronto.



Victor Weiskopf (izquierda), Maria Goeppert y Max Born (derecha) en Gotinga.



Foto de boda de Maria y Joe.



### Dos artículos pioneros

Mencionaremos ahora dos artículos de física que Maria envió a publicar desde la Johns Hopkins y que por su carácter pionero han tenido un impacto de larga duración.

Dirac había elaborado la teoría de la radiación, que aplicó al cálculo de los coeficientes de emisión, absorción y dispersión de un fotón. Maria consideró en su tesis el caso de dos fotones, y efectuó el cálculo hasta segundo orden de perturbaciones dependientes del tiempo. Los resultados aparecieron en un artículo publicado en 1931 en *Annalen der Physik*. Como las probabilidades de emisión o absorción obtenida eran tan pequeñas, pareció entonces que se trataba de procesos sin consecuencias observables. Pero esto cambió años después con la llegada del láser y el desarrollo de la óptica no lineal. En 1990 surgió la microscopía de barrido por excitación de dos fotones y se pudieron verificar los resultados de la tesis. En su honor, a la unidad para medir la sección eficaz de absorción de dos fotones se llama GM (por Goeppert Mayer): un GM corresponde a  $10^{-50}$  cm<sup>4</sup> s/fotón. Este artículo se sigue citando en la actualidad<sup>2</sup>, no sólo en revistas de microscopía sino también en revistas biológicas y médicas, pues esta técnica permite, entre otras cosas, obtener imagen de tejido vivo hasta una profundidad de un milímetro.

El segundo de estos artículos pioneros fue publicado en 1935 en *The Physical Review*. Tras una conversación con Eugene Wigner, Maria

decidió aplicar las mismas técnicas de su tesis al problema, en cierto modo análogo, de la doble desintegración beta nuclear, para tratar de entender la estabilidad de ciertos nucleidos. Si se representan las energías de enlace de un grupo de isobaros para un valor par del número másico A, en función del número atómico Z, se observa que éstas se sitúan en dos parábolas ligeramente desplazadas en la dirección vertical. Los nucleidos situados en la curva superior corresponden a los que tienen valores impares de Z, mientras que aquellos con valores pares se sitúan en la curva inferior. Todos los de la curva superior y casi todos los de la curva inferior se transforman en otro nucleido, de menor energía, bien sea por desintegración beta o por captura electrónica. Pero ocurre que a veces se observan dos nucleidos estables, con Z par. La cuestión era averiguar si el nucleido de mayor energía puede sufrir una doble desintegración beta. En 1934 Enrico Fermi había publicado su teoría de la desintegración beta elemental, como un proceso en el que un neutrón se transforma en un protón, con emisión de un electrón y un neutrino (en realidad, se trata de un antineutrino, pero esto no era sabido entonces). Maria adaptó las técnicas de su tesis al hamiltoniano deducido por Fermi. Llegó a la conclusión de que se trata de un proceso muy raro, pues encontró una vida media del núcleo emisor del orden de  $10^{17}$  años. Este gran número explica, por tanto, la existencia de los dos nucleidos estables. Aunque el presente interés por la doble desintegración beta tiene que ver con las propiedades de los neutrinos, este artículo se sigue citando en la actualidad.

### Una química en Nueva York

En 1939 los Mayer se desplazaron a Nueva York, donde habían ofrecido a Joe un puesto de profesor asociado de química en la universidad de Columbia. Maria se encontró con la misma desagradable situación de Baltimore: no podía tener ningún tipo de nombramiento en la misma universidad que su marido. En Columbia estaba Harold Urey, Premio Nobel de Química de 1934 por su descubrimiento del deuterio, quien conocía y apreciaba los trabajos de Maria. La apoyó en todo momento, como ilustra la siguiente anécdota. Los Mayer se disponían a publicar su libro escrito en Baltimore. Normalmente, al nombre de Joe se añadiría su afiliación como profesor de química en Columbia, pero Maria no tenía nada que añadir al suyo. Urey logró que la universidad permitiera a Maria dar algunas clases de química (sin sueldo, naturalmente), de modo que bajo su nombre apareciera *Lecturer in Chemistry*. El libro *Statistical Mechanics*, publicado en 1940, se convirtió en un texto de referencia en muchas universidades durante mucho tiempo: en 1963 se publicó la décima reimpresión. Pero la opinión general no estaba por apreciar el papel de las mujeres en la ciencia. A pesar de que

<sup>2</sup> Véase por ejemplo los artículos siguientes. B. Masters, P. T. C. So, "Antecedents of Two-Photon Excitation Laser Scanning Microscopy", *Microscopy Research and Technique* **63** (2004) 3; D. W. Piston, "When One is better than two: Elements of Intravital Microscopy", *PLoS Biology* **3** (2005) e207; A. Grzybowski, K. Pietrzak, "Maria Goeppert-Mayer (1906-1972): Two-photon effect on dermatology", *Clinics in Dermatology* **31** (2013) 221.

Maria ya había alcanzado un cierto renombre como científica, se solía atribuir a Joe la autoría del libro y a Maria las tareas de secretaria de su marido.

Fermi estaba también en Columbia, aunque por poco tiempo, pues en 1940 se marchó a la universidad de Chicago. Se había exiliado de la Italia fascista tras recibir el Premio Nobel de Física en 1938 por su descubrimiento de los elementos transuránicos. Cuando James Chadwick descubrió el neutrón en 1932, Fermi pensó enseguida en utilizarlo para sondear los núcleos pues, al no tener carga eléctrica, puede penetrar en el interior de los núcleos más fácilmente que los protones o las partículas alfa. Inició así un programa sistemático de bombardear núcleos con neutrones. Cuando llegó al uranio, observó emisiones de radiación beta que le hicieron pensar en elementos con número atómico superior a 92. Su idea era que el exceso de neutrones del uranio le haría emitir una beta y transformarse en un elemento con  $Z = 93$ . A su vez, éste podría absorber un neutrón y formar el elemento  $Z = 94$ , y así sucesivamente. Sin embargo, cuando los experimentos iniciados por Lise Meitner y Otto Hahn en busca de transuránicos culminaron en la identificación de la fisión del núcleo, quedó claro que hasta entonces no se habían interpretado correctamente los resultados. Es una ironía de la historia que Fermi, merecedor del Nobel por varios motivos, lo recibiera por un descubrimiento que resultó ser falso. El primer elemento transuránico, posteriormente llamado neptunio, fue identificado en 1941 por Edwin McMillan y Phillip Anderson.

En el ambiente prebélico de la época la fisión adquirió una importancia militar enorme. Un interés inmediato de los elementos transuránicos era que podrían ser utilizados como material físil, en lugar del uranio-235, un isótopo difícilmente separable del uranio natural. Pero se conocía poco la química del uranio y nada de los transuránicos. Por ello, Fermi sugirió a Maria que determinara teóricamente la valencia de estos elementos. A pesar de las simplificaciones de su cálculo, utilizando la aproximación de Thomas-Fermi para el potencial atómico, predijo que en torno a  $Z = 91$ - $92$  se empieza a llenar la capa atómica 5f, pero manteniendo la misma configuración externa de electrones para todos los elementos, lo que hace que éstos tengan las mismas propiedades químicas. Fue Glenn Seaborg quien introdujo la casilla de los actínidos en el sistema periódico, citando el artículo de Maria publicado en 1941.

Tras el bombardeo de Pearl Harbor, Estados Unidos entró en la Segunda Guerra Mundial. Justo al día siguiente, Maria recibió su primera oferta de trabajo remunerado, aunque a tiempo parcial (dos días por semana), como profesora del Sarah Lawrence College. Este centro había sido fundado en 1926 para dar lo que se consideraba una instrucción adecuada para señoritas de cla-

ses acomodadas. Evolucionó con el tiempo hasta convertirse en un *College* femenino con distintos niveles de instrucción universitaria. Se pidió a Maria que organizara un curso general sobre ciencia, y ella tuvo la idea original de mezclar en él temas de astronomía, de física y de química. A los pocos meses de empezar este curso, Joe fue reclutado como científico en un centro militar dedicado a hacer ensayos sobre explosivos y armas. Hasta el final de la guerra sólo estaba en casa los domingos y no todos. Además, en febrero de 1945 fue enviado durante unos meses al Pacífico, para verificar el uso de las armas y explosivos. Durante toda la duración de la guerra, Maria tuvo que ocuparse sola de los hijos.

### Una química en el proyecto Manhattan

Maria participó en trabajos relacionados con el proyecto Manhattan dedicado a construir las primeras bombas de fisión. Como la mayoría de los científicos, era consciente de que Alemania llevaba la delantera en el desarrollo de armas nucleares, aunque esperaba que la guerra acabara antes de que hubiera posibilidad de utilizar la bomba atómica. En 1942 Urey le propuso trabajar en el proyecto SAM (*Special Alloy Materials*), cuyo objetivo era separar el isótopo físil U-235 del uranio natural. Maria se lo pensó antes de responder. No quería dejar solos a sus hijos, pero como nueva ciudadana estadounidense sentía que debía participar en el esfuerzo bélico. Tampoco le entusiasmaba ayudar a la lucha contra su país natal, aunque siempre repetía que se trataba de una guerra contra Hitler, no contra Alemania. Finalmente, aceptó con condiciones: seguiría con su docencia, trabajaría a tiempo parcial, no lo haría los fines de semana y se quedaría en casa si alguno de sus hijos caía enfermo. Todas estas condiciones fueron aceptadas por Urey, tanta era la confianza que tenía en las capacidades de Maria. Pero el trabajo era cada vez más absorbente y, en 1943, Urey escribió al Sarah Lawrence solicitando oficialmente para Maria un permiso sin sueldo.



Joe, Maria y Karl Herzfeld.

Maria dirigió un equipo de unas quince personas para intentar la separación isotópica mediante reacciones fotoquímicas. A la postre resultó ser un método poco eficiente pues, como es sabido, la técnica usual utiliza potentes centrifugadoras. Maria también estudió las propiedades termodinámicas del hexafluoruro de uranio, un gas utilizado para la separación isotópica en las centrifugadoras. También participó en el proyecto secreto Opacity, que llevaba Teller. Maria calculó la opacidad de la radiación en presencia de núcleos muy pesados y a muy altas temperaturas, con el objetivo de evaluar las pérdidas de energía por radiación en las condiciones de una bomba de fisión. Años después, Maria decía de estos años: “De repente, me tomaron en serio y me consideraron un buen científico”.

En contra de lo que pensaba al principio, la dedicación parcial se convirtió en tiempo completo. Además, debió hacer varias visitas a Los Alamos. Apenas tuvo tiempo para dedicar a sus hijos, sometida a la presión del trabajo y la ansiedad de la guerra. A pesar de contar con la ayuda de una persona que se ocupaba de ellos, Maria tenía el sentimiento de que los estaba abandonando. Cuando se produjo la rendición de Alemania, Maria volvió a su trabajo a tiempo parcial en el Sarah Lawrence College y a su extraña situación en la universidad de Columbia, aunque por poco tiempo.

### Una física nuclear en Chicago

Al acabar la guerra, la universidad de Chicago decidió crear una serie de institutos de investigación básica. Ya contaba con la presencia de Fermi, de Frank y de Willard Libby (Premio Nobel de Química de 1960 por su método de datación con carbono-14). Contrataron a muchos científicos que habían estado implicados en el proyecto Manhattan, como Urey, Teller y Joe Mayer. Mientras que a Joe se le ofreció un puesto de catedrático de química, Maria fue nombrada catedrática voluntaria sin sueldo, por aquello del antinepotismo, en el departamento de Física, y se integró en el recién creado Instituto de Energía Nuclear. En Chicago sintió por primera vez que era recibida con los

brazos abiertos por sus colegas, muchos de ellos viejos conocidos y amigos que apreciaban su trabajo. Cuando poco después se creó el Laboratorio Nacional de Argonne, dedicado a la física nuclear y de partículas, Maria fue contratada a tiempo parcial como Científico Senior en su división de física teórica, sin dejar su puesto voluntario en la universidad.

Teller volvió a solicitar su colaboración para tratar de explicar el origen de los elementos. En aquellos años se pensaba que todos ellos se formaron cuando el Universo era relativamente joven, tal vez al mismo tiempo que éste. Hasta años después no se supo el papel de las explosiones de supernovas en la formación de los elementos. La idea era estudiar qué cadenas de reacciones nucleares podrían originar todos los núcleos. Después de publicar juntos un artículo sobre lo que no eran más que conjeturas, Teller se dedicó a otras cosas.

Sin embargo, Maria había observado algo que le llamó la atención en la información que recopiló sobre los núcleos. El material más importante eran unas tablas elaboradas por el geoquímico noruego Victor Goldschmidt, con las abundancias de los diferentes nucleidos observadas en la Tierra y en los espectros estelares. Maria también contaba con la información más reciente proporcionada por los laboratorios de física nuclear e incluso podía pedir a sus colegas de Argonne que midieran las secciones eficaces de absorción de neutrones por tal o cual nucleido. Entre la enorme masa de datos, observó que los nucleidos con 2, 8, 20, 28, 50, 82 y 126 protones o neutrones eran muy especiales. Ya en 1934, Walter Elsasser había mencionado las peculiaridades de los números 2, 8 y 20, pero ahora Maria disponía de más y mejores datos. Sin embargo, Teller no dio ninguna importancia a estos números e insistió a Maria en que los olvidara. Tampoco Wigner creía que tuvieran significado físico y, como muestra de su escepticismo, les dio el nombre de “números mágicos”, que ha quedado para la posteridad. En 1948 Maria publicó un artículo con el título “On Closed Shells in Nuclei”, en el que recogía los hechos experimentales que muestran que núcleos con 2, 50, 82 o 126 neutrones o protones son particularmente estables.

Hablaba de capas en los núcleos por analogía con las capas electrónicas en los átomos. En muy buena aproximación, un electrón se mueve como una partícula independiente en un campo medio formado por la atracción del núcleo y el apantallamiento debido a la repulsión con los demás electrones. Cada orbital o estado electrónico se caracteriza por ciertos números cuánticos y la energía del estado es la misma para ciertas combinaciones de estos números. De aquí surge una estructura en capas de los electrones: al ir llenando las capas con electrones, y teniendo en cuenta el principio de exclusión de Pauli, se llega a explicar la Tabla Periódica. Las capas electrónicas se



Edward Teller (izquierda), Maria, Joe y James Frank (derecha).



lleen con 2, 10, 18, 36, 54 y 86 electrones, que corresponden a los gases nobles, caracterizados por una escasa reactividad química. Esta estructura de capas se manifiesta también en forma de discontinuidades en ciertas magnitudes, como por ejemplo las energías de ionización. Aunque en el caso de los núcleos no hay campo central, se aceptó la idea de que un nucleón (protón o neutrón) se mueve en un campo medio creado por la interacción con los demás nucleones. La explicación de los números mágicos observados parecía sencilla: corresponden al llenado de capas.

Había que encontrar un campo central para simular el confinamiento de un nucleón dentro del núcleo. Los casos más sencillos se estudian en cualquier curso inicial de física cuántica. Un oscilador armónico produce cierre de capas para 2, 8, 20, 40, 70, 112, 168... protones o neutrones. Un pozo cuadrado, para los números 2, 8, 18, 20, 34, 40, 58, 68, 90, 92, 106, 132, 138... Como sólo hay tres coincidencias con los números mágicos observados, se pensó que estos modelos sólo servían para los núcleos ligeros, pero no para los pesados, aunque hubo intentos por encontrar otros potenciales más complicados, esperando así reproducir los números mágicos observados.

Sin embargo, había argumentos de peso en contra de esta imagen. La interacción nuclear es de corto alcance y muy intensa, mientras que la interacción entre electrones es de largo alcance y comparativamente poco intensa. Por ello se consideraba carente de sentido hablar de movimiento individual de los nucleones a causa de la intensidad de la interacción nuclear. Tenía más sentido comparar un núcleo con una gota líquida, donde el recorrido libre medio de un componente es comparable al alcance de la interacción. Esta idea se vio reforzada cuando Bohr describió la captura de neutrones por núcleos como un proceso en el que se forma un núcleo compuesto donde se crean excitaciones colectivas, hasta que finalmente este sistema compuesto acaba por romperse. En sus propias palabras: “En el átomo y en el núcleo tenemos que tratar en efecto con dos casos extremos de problemas mecánicos de muchos cuerpos para los que una aproximación que se basa en una combinación de problemas de un cuerpo, tan efectiva en el primer caso, pierde cualquier validez en el segundo donde, desde el primer momento, hemos de tratar con aspectos colectivos esenciales de la interacción entre las partículas constituyentes”<sup>3</sup>. De ahí que se considerara que un modelo de partícula independiente: “ha de tomarse sólo como una aproximación de orden cero. Esto ya indica que los efectos relacionados con el llenado de una capa no serán muy marcados”<sup>4</sup>.



Fotografía publicada al dar la noticia de la concesión del premio Nobel a una madre. Maria parece buscar inspiración con una regla de cálculo en la mano.

### De los números mágicos al Premio Nobel

Maria logró interesar a Fermi en la sistemática que había observado y sus esfuerzos por encontrar una explicación a los números mágicos. Según contó Maria años después “Un día, cuando Fermi se iba de mi despacho, preguntó: ‘¿hay alguna indicación del espín-órbita?’. Sólo alguien que hubiera vivido con los datos tanto tiempo como yo podía contestar inmediatamente: ‘Desde luego que sí, y eso lo explica todo’. Fermi se mostró escéptico y me dejó con mi numerología”. Lo que vio Maria es que la orientación paralela de los momentos angulares orbital y de espín tiene menor energía que la anti-paralela, y si la interacción espín-órbita es bastante intensa pueden dar lugar a estados muy separados en energía, originando otras capas.

A los pocos días, cuando pudo escribir con detalle las consecuencias, Fermi quedó tan convencido que incluyó todo ello en sus clases de física nuclear. Tanto Fermi como Joe le instaron a que publicara rápidamente sus resultados. Maria pensó que Fermi debía figurar como coautor, por su pregunta sobre el espín-órbita. Este se negó, diciendo que todo el trabajo era de Maria y si aparecía su nombre todo el mundo le atribuiría el mérito a él. A principios de 1949, Maria escribió una breve nota para *Physical Review*.

Vamos a comentar ahora una interesante relación de fechas. La nota fue recibida el 4 febrero, pero Maria se enteró de que otros físicos iban a mandar otra nota (recibida el 23 de febrero) sobre este asunto. Aunque su ordenación de niveles de energía era bastante artificial y llegaban a conclusiones diferentes a la suya, Maria pidió al editor que se publicaran juntas. Para Joe, los retrasos y miramientos de Maria podían comprometer la primacía de su trabajo. Mientras tanto, en Heidelberg, los alemanes Otto Haxel, Hans Jensen y

<sup>3</sup> N. Bohr: “Neutron Capture and Nuclear Constitution”, *Nature* **137** (1936) 344.

<sup>4</sup> H. A. Bethe, R. F. Bacher: “Nuclear Physics. A. Stationary States of Nuclei”, *Rev. Mod. Phys.* **4** (1936) 82.

Del brazo del rey Gustavo de Suecia en la ceremonia de entrega de los Premios Nobel.



Hans Suess habían llegado a conclusiones análogas sobre la interacción espín-órbita. Enviaron a *Nature* una nota que fue rechazada por ser considerada mera numerología. Entonces probaron en *Physical Review*, donde fue recibida el 18 de abril. Fue publicada en el mismo número de la nota de Maria, pero unas 200 páginas antes. Al leer la nota de los alemanes, Maria quedó “consternada durante unos cinco minutos”, pero enseguida vio que esto no hacía más que confirmar su teoría. Poco después Jensen le escribió: “Usted ha convencido a Fermi y yo a Heisenberg, ¿qué más podemos pedir?”.

En 1950 Maria publicó dos largos artículos sobre el modelo de capas con espín-órbita. Naturalmente, el éxito del modelo no se basaba sólo en la explicación de los seis o siete números mágicos. Explicaba también otras propiedades, como el momento angular y la paridad de los núcleos, la existencia de isómeros de larga vida media, etc. Al año siguiente, durante una visita a Alemania, Maria conoció personalmente a Jensen. Decidieron escribir un libro, desde Chicago y Heidelberg, para presentar todas las consecuencias de su modelo. Una vez acabado, Jensen manifestó sus escrúpulos en figurar como autor, porque decía que Maria había escrito prácticamente todo el libro. Después de algunas discusiones, propuso que no se siguiera el orden alfabético de autores, para que Mayer figurara antes que Jensen; finalmente quedó como Maria Goeppert Mayer y J. Hans D. Jensen. Recordando los comentarios sobre el libro que escribió con Maria, Joe se reía de estas discusiones. Decía que siempre que hay un trabajo firmado por un hombre y una mujer, el hombre se lleva todo el mérito. No fue el caso de este libro,

*Elementary Theory of Nuclear Shell Structure*, publicado en 1955.

En realidad, el modelo de capas elemental es lo que hoy en día llamamos modelo de partícula independiente. El actual modelo de capas utiliza una combinación lineal de orbitales nucleares en niveles próximos de energía. Las objeciones planteadas en su día por Bohr y otros tiene cumplida respuesta en este modelo general, cuya capacidad predictiva se ve sólo limitada por las capacidades de cálculo del momento.

En 1959 la universidad de California en San Diego hizo una oferta conjunta a los Mayer: una cátedra de química a Joe y una cátedra de física a Maria. De repente, la universidad de Chicago olvidó las leyes antinepotismo que había estado aplicando en los últimos años y se apresuró en ofrecer a Maria una cátedra de física, pensando retener así a la pareja. Se ve así que, pasados los años de la gran depresión, la ley antinepotismo no era más que un pretexto para lograr que esposas cualificadas trabajaran sin salario. Pero los Mayer habían decidido ir a California, donde ya estaban algunos de sus amigos. Al poco de llegar, con cajas aún por desembalar, Maria sufrió un ictus que le dejó secuelas: se paralizó su brazo izquierdo, perdió fuerza en el derecho y hablaba con cierta dificultad.

Apenas cuatro años más tarde, recibió la noticia de que le habían concedido el Premio Nobel de Física. Un periódico local anunció así la noticia: “Una madre de San Diego gana el Premio Nobel de Física”. Un titular que se repite con frecuencia cuando una mujer logra el éxito en ciertos campos<sup>5</sup>. Una mitad del Premio Nobel de Física de 1963 fue atribuido a Wigner, “por sus contribuciones a la teoría del núcleo atómico y las partículas elementales, particularmente a través del descubrimiento y aplicación de principios fundamentales de simetría”, y la otra mitad fue repartida entre Maria y Jensen “por sus descubrimientos referentes a la estructura nuclear de capas”. En la ceremonia de entrega, Maria tuvo que ser acompañada por una persona para recoger el diploma y la medalla que difícilmente podría sostener ella en su mano semiinvalída.

## Conclusión

Después de sufrir el ictus, Maria siguió dando clases y realizando otras tareas académicas, pero dejó completamente la investigación. Siempre fue una fumadora compulsiva, lo que no facilitó su recuperación. Su estado de salud se degradó progresivamente, a finales de 1971 sufrió un ataque cardíaco y murió de una embolia pulmonar el 20 de febrero de 1972. Harold Urey, junto con otros compañeros de la universidad de San Diego y viejos amigos, escribieron un elogio fúnebre. Decían en él que

<sup>5</sup> En julio de 2019 algunos periódicos españoles daban el titular: “Una madre de tres hijos es la primera mujer general del ejército”.



Maria era “una combinación única de encanto femenino y una aguda mente analítica”, “buscada como interlocutora en pie de igualdad por grandes científicos”, “estaba hecha en el mismo molde” que éstos. Olvidaron decir que fue también un claro ejemplo de discriminación contra las mujeres, que durante cerca de treinta años investigó y dio clases sin recibir un salario a tiempo completo.

Tras recibir el Premio Nobel, una niña de once años le escribió preguntando cómo podía una mujer haber logrado tanto en la ciencia. Maria le respondió: “He sido muy afortunada en mi carrera. Afortunada por venir a América cuando lo hice, afortunada al encontrar a mi marido, y afortunada al elegir mi investigación”. Efectivamente, Joe siempre la apoyó en los momentos de desánimo por falta de perspectivas para su carrera. Ambos compartían el mismo entusiasmo por la ciencia y discutían en todo momento sobre todo tipo de cuestiones científicas. Este entusiasmo no era compartido por los hijos. En los años posteriores a la guerra, la hija les impuso que no hablaran de ciencia durante las comidas. Decía que con dos científicos en la familia, hay uno y medio de más.

También fue afortunada al encontrar a científicos de primera fila que apreciaron inmediatamente su valía y la apoyaron siempre. Y, haciendo de necesidad virtud, supo adaptarse en todo momento a las circunstancias. Empezó a estudiar matemáticas y acabó graduándose en física. Luego se dedicó a

cuestiones de física química, química física, estado sólido, física nuclear, problemas más técnicos relacionados con el proyecto Manhattan... Incluso programó el ordenador ENIAC para realizar simulaciones Monte Carlo de reactores nucleares con neutrones rápidos. Sin tener preparación previa en ninguno de estos campos, no dudó en adquirir los conocimientos necesarios sobre la marcha, en seminarios y conversaciones con otros colegas, para poder resolver los problemas concretos que se planteaba. En lo que se refiere al modelo de capas podemos decir que fue precisamente su ignorancia del conocimiento estándar de la época lo que le permitió desarrollar sin trabas su intuición física y darse cuenta de lo que otros habían ignorado antes que ella.

### Bibliografía

- [1] SHARON BERTSCH MCGRAYNE, *Nobel Prize Women in Science* (Carol Publishing, Nueva York, 1993).
- [2] JOAN DASH, *A Life of One's Own* (Harper and Row, Nueva York, 1973).
- [3] JOSEPH P. FERRY, *Maria Goeppert Mayer* (Chelsea House, Philadelphia, 2003).
- [4] KAREN E. JOHNSON, “Science at Breakfast Table”, *Physics in Perspective* **1**, 22-34, 1999.
- [5] PETER C. MAYER, *Son of (Entropy)<sup>2</sup>* (AuthorHouse, Bloomington, 2011).
- [6] ROBERT G. SACHS, *Maria Goeppert Mayer. Biographical Memoirs* **50** (1979) 311. National Academy of Sciences.

**Fe de erratas.** En el vol. 33 n.º 3 (2019) pág. 59, “Reseñas de libros de interés”, libro *Antimateria*, se han advertido los siguientes errores: el nombre de la autora del libro es “Beatriz Gato Rivera” y el número de páginas del libro es 142 en lugar de 134, como se hace constar por error. Lamentamos las molestias.

