



© Fondo de Cultura Económica

PIONEROS DE LAS CIENCIAS NUCLEARES

Autor: PEDRO BOSCH / SILVIA BULBULIAN / MARISELA FERNÁNDEZ / MELANIA JIMÉNEZ / NURIA SEGOVIA / MARCOS SOLACHE / ARIEL TEJEDA

- [COMITÉ DE SELECCIÓN](#)
- [EDICIONES](#)
- [INTRODUCCIÓN](#)
- [I. EL DESCUBRIMIENTO DE LA RADIATIVIDAD NATURAL](#)
- [II. LA ESTRUCTURA DEL ÁTOMO](#)
- [III. LA RADIATIVIDAD ARTIFICIAL](#)
- [IV. PROPIEDADES DEL NEUTRÓN TÉRMICO](#)
- [V. LA FISIÓN NUCLEAR: OTTO HAHN Y LA ESCUELA ALEMANA](#)
- [VI. CONCLUSIÓN](#)
- [APÉNDICE 1.](#)
- [APÉNDICE 2.](#)
- [COLOFÓN](#)
- [CONTRAPORTADA](#)



COMITÉ DE SELECCIÓN

Dr. Antonio Alonso

Dr. Juan Ramón de la Fuente

Dr. Jorge Flores

Dr. Leopoldo García-Colín

Dr. Tomás Garza

Dr. Gonzalo Halffter

Dr. Guillermo Haro †

Dr. Jaime Martuscelli

Dr. Héctor Nava Jaimes

Dr. Manuel Peimbert

Dr. Juan José Rivaud

Dr. Emilio Rosenblueth †

Dr. José Sarukhán

Dr. Guillermo Soberón

Coordinadora Fundadora:

Física Alejandra Jaidar †

Coordinadora:

María del Carmen Farías

Inicio



Primera edición, 1994

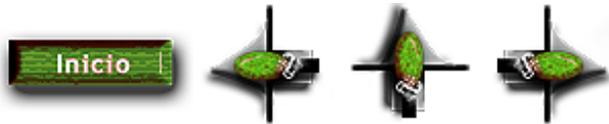
La Ciencia desde México es proyecto y propiedad de Fondo de Cultura Económica, al que pertenecen también sus derechos. Se publica con los auspicios de la Subsecretaría de Educación Superior e Investigación Científica de la SEP y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

D R. © 1993, FONDO DE CULTURA ECONÓMICA S. A. DE C. V.

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

ISBN 968-16-4213-9

Impreso en México



INTRODUCCIÓN

SILVIA BULBULIAN

PEDRO BOSCH

MELANIA JIMÉNEZ-REYES

De 1896, fecha en la que se descubre la radiactividad, a 1942, cuando Fermi monta la primera pila atómica, un grupo pequeño de investigadores consiguió desentrañar los secretos del átomo, proponer una estructura que lo definiera y crear la tecnología derivada de estos hallazgos. Fueron cuatro escuelas las que protagonizaron tales estudios: un grupo francés (Becquerel, los Curie y los Joliot-Curie), un grupo anglosajón (Chadwick, Rutherford y Thomson), uno italiano (Fermi) y finalmente uno austriaco-alemán (Frisch, Hahn, Meitner y Strassmann). El progreso en el conocimiento fue muy rápido porque los resultados se intercambian y se discutían en los congresos en un ambiente totalmente cosmopolita; con el saber como único objetivo.

En la figura 1 intentamos presentar los principales acontecimientos de la historia del átomo en el contexto-mundial del desarrollo de la ciencia y de la tecnología, de las bellas artes, así como los hechos relevantes de la historia del mundo, desde 1890 hasta 1978. Nótese los cúmulos de importantes descubrimientos sobre el átomo en la última década del siglo pasado y en los años 30 del presente y; además, que esa época la vivieron también algunos de los individuos más geniales y temperamentales de la historia: Sarah Bernhardt, Picasso y Stravinski en el arte; Joyce, Valle-Inclán y Verlaine en la literatura; Edison, Einstein y Fleming en la ciencia. Muchos de los más destacados científicos en el campo de la radioactividad fueron víctimas de las circunstancias históricas. Así Meitner tuvo que huir de Alemania y Fermi de Italia para refugiarse en Estados Unidos. Algunos de ellos reaccionaron valientemente contra la injusticia y se comprometieron con la vida política de sus países: O. Hahn militó activamente en contra de las armas nucleares y una de las facetas más atractivas de la vida de F. Joliot fue su compromiso político que culminó con la presidencia del Comité de la Paz.

En este libro se narra la biografía de los descubridores de la radiactividad, de la radiactividad artificial, de la estructura del átomo, de las propiedades del neutrón y de la fisión nuclear, es decir, la de los responsables de los cinco peldaños que llevaron a lo que hoy son las ciencias nucleares (véanse figuras 1 y 2). Los descubrimientos quedan ordenados según la cronología de los principales eventos. Por eso, aunque Hahn es más viejo que Rutherford, en vista de que su artículo sobre la fisión nuclear fue publicado posteriormente, cierra la serie de biografiados.

Pero antes de entrar en materia es necesario hacer un recuento de los principales acontecimientos de modo que con una visión global el lector sepa ubicar a cada uno de los personajes en su ambiente científico.

Imaginemos, entonces, a Becquerel y a los esposos Curie, a principios de este siglo, en el París de *La Belle Epoque*, observar asombrados que un mineral de uranio emita radiaciones, que fueron identificadas después como partículas cargadas eléctricamente (positivas y negativas), y como radiación electromagnética semejante a la luz visible pero de diferente longitud de onda. Fue entonces cuando se inició una cascada de descubrimientos atropellados que revolucionaron muchos de los conceptos de la física decimonónica. Hubo que elaborar una nueva teoría sobre la estructura de la materia.

Enterado de los experimentos de los franceses, Thomson, en Inglaterra, propuso la siguiente estructura para el átomo: una esfera compacta cargada positivamente pero que contenía cargas negativas en su interior, para que la carga total fuese neutra. Este modelo duró poco ya que muy pronto Rutherford, alumno de Thomson, logró demostrar que mediante experimentos sencillos que el átomo es casi hueco, excepto por un pequeñísimo espacio ocupado por un núcleo pesado formado por partículas positivas (hoy conocidas como protones). La neutralidad del átomo se consigue, en el modelo de Rutherford, con electrones que se mueven a distancias enormes alrededor del núcleo, tal y como lo hacen los planetas alrededor del Sol. Aunque el modelo de Rutherford se ha perfeccionado, el concepto de un átomo constituido por un núcleo denso y positivo rodeado de electrones en movimiento no ha cambiado.

	<i>Historia del átomo</i>	<i>Ciencia y tecnología</i>	<i>Bellas Artes</i>	<i>Historia del mundo</i>
1970	Ensayos para el control de la fusión nuclear (a partir de 1978)	-Primer hombre en la Luna		-Movimientos estudiantiles en varios países
		Vuelos de los primeros astronautas	- <i>Cien años de soledad</i> (G. García Márquez)	Crisis EUA-Cuba
1960	-Navíos de propulsión nuclear -Primera central nuclear -Bomba	-Láser (C.H. Townes) -Modelo del ADN (J.W. Watson y F.Crick)	- <i>El Laberinto de la soledad</i> (O.Paz) Murales (R. Tamayo)	
1950			- <i>La vida de Galileo</i> (B. Brecht)	
	-Bombas atómicas sobre Hiroshima y Nagasaki -La pila atómica (E. Fermi)			Segunda Guerra Mundial
1940			<i>Por quién doblan las campanas</i> (E. Hemingway)	
	-La fisión nuclear (O.Hahn y L. Meitner)		- <i>Guernica</i> (P. Picasso)	Expropiación del petróleo en México Guerra civil española
	-Radioactividad artificial (F.I. Joliot Curie)		- <i>Bodas de Sangre</i> (F. García Lorca)	
	-El neutrón (J.Chadwick)	-El modelo electrónico de televisión		Guerra cristera en México
1930		La penicilina (A. Fleming)		
			- <i>Ulises</i> (J.Joyce) -Murales (D.Rivera)	
1920	-Transmutación de elementos y el protón (E.Rutherford)			
		-Teoría de la relatividad general (A. Einstein)		-Revolución Rusa

				- Primera Guerra Mundial
1910			-Grupo Jinete Azul	-Empieza la Revolución Mexicana
			- <i>El pájaro de fuego</i> (I.F. Stravinski)	Porfiriato
			- <i>Las señoritas de Aviñon</i> (P. Picasso)	
		-Teoría de la relatividad especial (A. Einstein)		
	5) Radiaciones alfa y beta (E. Rutherford)	-Vuelo aeronáutico (Hermanos Wright)		
	4) Polonio y radio (P. y M. Curie)			
1900	<u>5</u> 3) El electrón (J.J. Thomson)			
	<u>4</u> 2) Radioactividad natural (A.E. Becquerel)	- Ondas de radio (G. Marconi)		Independencia de Cuba
	<u>3</u> 1) Rayos X (C.C. Roentgen)	-El psicoanálisis (S. Freud)	Nazarín (B. Pérez Galdós)	
			- <i>Suite del Cascanueces</i> (P.I. Tchaikovski)	Etapa Porfirista (México)
1890	Rayos catódicos (G. Crookes, 1879)			

Figura 1. Los principales acontecimientos de la historia del átomo, dentro del contexto mundial.

Desde luego Rutherford se preguntó como tanta carga positiva podía acumularse sin repelerse, en un volumen tan pequeño como el núcleo y concluyó que la estabilidad necesitaba la presencia de partículas sin carga pero de masa semejante a la de los protones. Así fue como postuló la existencia de partículas neutras. Once años después (en 1932), su discípulo, Chadwick comprobó la existencia de dicha partícula (hoy conocida como neutrón) en el núcleo del átomo. Este descubrimiento fue crucial para los acontecimientos científicos que se siguieron en Europa. En efecto, en 1934, solo dos años más tarde, los Joliot-Curie probaron la existencia de la radiactividad artificial; en 1939, Hahn propuso la escisión del núcleo, y diez años después del descubrimiento del neutrón, Fermi diseñó en Estados Unidos la primera pila atómica. Luego, en 1945 estallaron las bombas de Hiroshima y de Nagasaki. Así arrancó un campo de la física, el de la física nuclear, cuyas aplicaciones abarcan tanto las reacciones nucleares que se dan en las estrellas como las que se dan en la Planta Nucleoeléctrica de Laguna Verde.

La física nuclear estudia ese minúsculo trozo de materia que es el núcleo atómico. El núcleo es 10 000 veces más pequeño que el átomo en cuyo centro se encuentra. ¡La proporción existente entre el tamaño del núcleo y el del átomo es la misma que entre una bellota y una casa! Sin embargo, a pesar de la evidente dificultad de estos estudios, hoy sabemos que el núcleo esta constituido por neutrones y protones, tal y como la de los protones es de 1 840 veces mayor que la de dos electrones. Desde luego, el neutrón carece de carga eléctrica pero el protón tiene una carga positiva de la misma magnitud que el electrón. Cuando el número de electrones es igual al número de protones de la carga del átomo es neutra. Si el número de protones de dos átomos es el mismo pero el número de neutrones es diferente se dice que son isótopos de un elemento. Los isótopos radiactivos se manejan hoy en día en la medicina, la química, la biología, las ciencias del espacio y hasta en la arqueología. En la actualidad se conocen más de 2 600 especies nucleares diferentes. Finalmente, hay que insistir en que las propiedades químicas de un elemento dependen casi por entero del numero y distribución de los electrones de sus átomos.

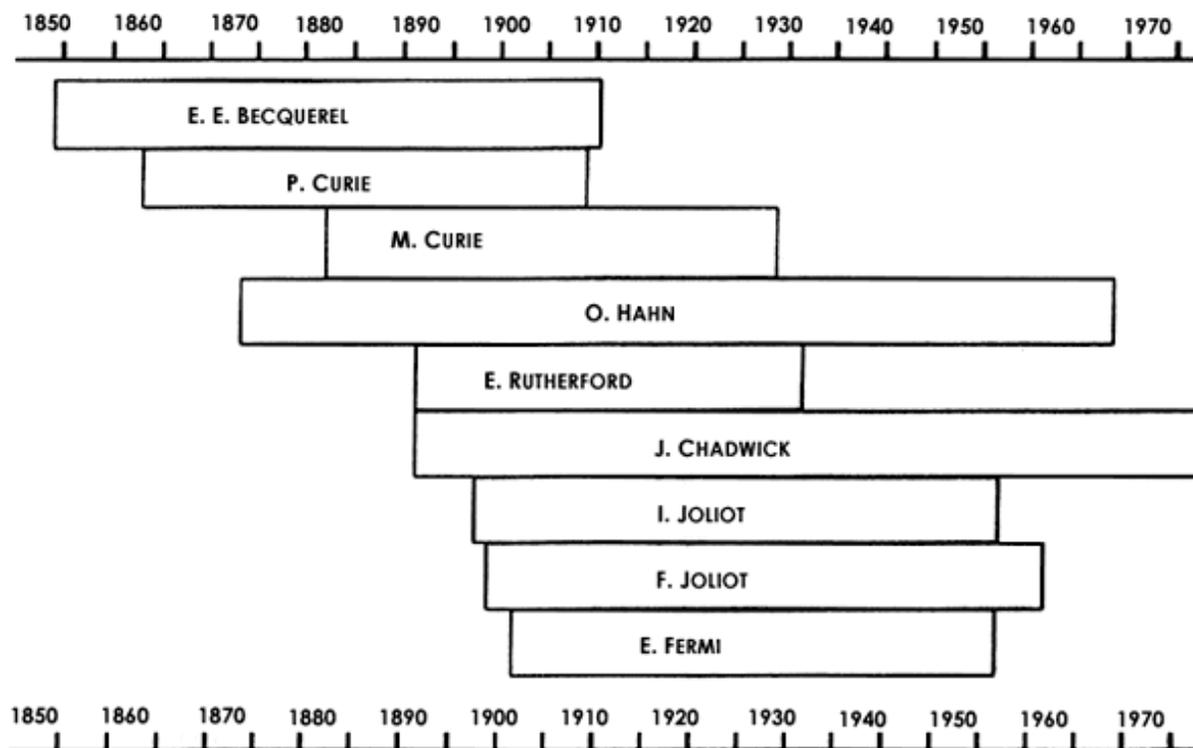


Figura 2. Lapsos de vida de los científicos más notables de la historia del átomo.

Sigamos, pues, las huellas que los pioneros de la radiactividad dejaron tras de sí en su continuo afán por entender la estructura y las propiedades de la materia. Con ellos tocaremos la retirada ante los callejones sin salida y con ellos nos asombraremos de las maravillas de la Naturaleza. Será difícil no tomar partido en sus querellas científicas y en sus disputas personales, pero revivirlas no solo ilustra la personalidad de cada uno de ellos sino que revela como "se hace la ciencia" y cual es el entorno necesario para que florezca.

Cada capítulo está escrito por especialistas diferentes y es autónomo. Así, cada uno de los temas se puede leer por separado. Esta organización tiene la ventaja de que ciertos conceptos se presentan más de una vez pero se abordan desde puntos de vista tanto históricos como científicos diferentes, de modo que se enriquece el entendimiento de las ciencias nucleares, lo que constituye el objetivo fundamental del libro.



I. EL DESCUBRIMIENTO DE LA RADIOACTIVIDAD NATURAL

MELANIA JIMÉNEZ-REYES
SILVIA BULBULIAN

URANIA,

MUSA DE LA ASTRONOMÍA

EL URANIO el elemento químico que ocupa la casilla 92 de la Tabla Periódica, fue descubierto en 1789 por el químico alemán Maarten Heinrich Klaproth (1743-1814) quien, por cierto, también fue el primero en aislar el titanio. Los estudios que Klaproth realizó con el polvo negro obtenido a partir de la pechblenda [*la pechblenda es un óxido natural del uranio, más adelante se ofrece una explicación más amplia sobre esta sustancia*] demostraron que se trataba de un nuevo elemento cuyas propiedades eran muy diferentes a las de los ya conocidos. Klaproth llamó a ese elemento uranio, inspirándose en el nombre del planeta descubierto poco antes. En efecto, el hallazgo del planeta Urano, realizado en 1781 por el angloalemán John Frederick William Herschel, causó gran repercusión en el mundo entero porque desde la antigüedad se había considerado a Saturno como el planeta más alejado del Sol: tiempo después se descubrirían también Neptuno y Plutón. Herschel se inspiró para elegir el nombre del planeta que había descubierto en Urania, la musa de la astronomía y de la geografía.

Desde su descubrimiento y hasta finales del siglo XIX, el uranio fue considerado como un elemento más y sus aplicaciones se reducían a la coloración de vidrios y cerámicas, lo que ahora parece insensato debido a sus propiedades radiactivas. Después del descubrimiento del radio, los minerales de Uranio se utilizaron como fuente para extraerlo. No fue sino hasta 1939, fecha del descubrimiento de la fisión nuclear, cuando el uranio, por sí mismo, atrajo el interés del mundo.

LOS RAYOS X

A principios del siglo XIX, Faraday y Davy observaron un brillo intenso en los tubos de descarga, cuando pasaba por ellos la electricidad. Los tubos de vidrio que idearon después, Crookes en Inglaterra y Hittorf en Alemania, en los cuales se lograba un vacío casi perfecto, permitieron comprobar que esas descargas eléctricas se originan en el cátodo y se dirigen hacia el ánodo. Por tal motivo esos rayos fueron denominados catódicos y una de sus características es que son fácilmente absorbidos por el aire.

Quien conociera a Wilhelm Konrad Roentgen (1845-1923) cuando tenía 23 años, jamás hubiera pensado que llegaría a ser un personaje tan importante en la historia de la ciencia. Lo habían expulsado de la Escuela Técnica de Utrecht, Alemania, por haberse burlado de un maestro y como secuela se le había negado el ingreso a la Universidad local. En 1868 logró ingresar a la Escuela Politécnica de Zurich, Suiza, pero allí no se distinguió por sus estudios sino por su participación en un sinnúmero de actividades sociales y deportivas. Un año después uno de sus profesores logró despertar en él su verdadera vocación: la física, en la que volcó desde entonces toda su energía.

Años más tarde, siendo Roentgen profesor y director del Instituto de Física de la Universidad de Wurzburg, Alemania, decidió participar en la búsqueda de nuevas propiedades de rayos catódicos. Durante el curso de sus investigaciones observó que una pantalla recubierta con platino-cianuro de bario [*la fórmula química de este compuesto es la siguiente: $Ba Pt(CN)_4 4H_2O$*] brillaba con luz propia cuando se encontraba a cierta distancia del tubo de rayos catódicos. Se dio cuenta de que la radiación que salía del tubo era diferente a los rayos catódicos, porque podía atravesar el aire, y porque al ser absorbida por algunas sustancias, éstas las volvían a irradiar en forma de luz visible. Roentgen realizó estos experimentos a finales de 1895 y llamó Rayos X a dichas radiaciones, por ser hasta entonces desconocidas. A partir de ese momento, el físico alemán dedicó su tiempo al estudio de las propiedades de los rayos X, que tantas aplicaciones han encontrado. En 1901, Wilhelm Konrad Roentgen fue galardonado con el primer premio Nobel de física.

LA FAMILIA BECQUEREL

Es curioso comprobar que los descendientes de una misma familia puedan distinguirse en una rama del saber. En la música, el caso de los Bach es el más citado, pero en las ciencias existe el caso de los Curie, el de los Friedel o el de los Becquerel. Quizás, como es el caso de los descubrimientos "casuales", el éxito de estas dinastías se deba a un patrimonio cultural y a un momento histórico, pero preferimos que el lector saque sus propias conclusiones presentándole la historia de los Becquerel.

Antoine César Becquerel nació en 1788 en Chatillon sur Loing, Francia. En la Escuela Politécnica obtuvo el título de ingeniero y después de un activo servicio en el ejército, se dedicó al estudio de la mineralogía, la electricidad, la electroquímica y la bioquímica. Desde 1837 hasta poco antes de su muerte en 1878, fue profesor de Física en Museo de Historia Natural de París. La variedad de temas que le interesaron se ilustra con los títulos de sus publicaciones: *Tratado de electricidad y magnetismo* (1834 -1840), *Tratado de Física y su relación con la química* (1842), *Elementos de electroquímica* (1843), *Tratado completo del magnetismo* (1845), *Elementos de Física terrestre y de meteorología* (1847) y *Los climas y la influencia que ejercen los suelos boscosos y sin bosques* (1853). Por sus valiosos trabajos, mereció en 1875 la medalla Copley, de la Sociedad Real de Inglaterra y se le considera como uno de los fundadores de la electroquímica porque fue el primero en utilizar el proceso electrolítico [*un proceso electrónico es el que se lleva a cabo cuando se hace pasar una corriente eléctrica a través de algunas sustancias conductoras (electrolitos)*] para separar el metal del mineral. Antoine César Becquerel también inventó una aguja termoelectrónica [*consiste en un dispositivo que aprovecha la diferencia de la temperatura entre dos puntos de un material metálico para producir una corriente eléctrica*] que mide la temperatura interna de los cuerpos.

A su muerte, el puesto que ocupaba en el Museo de Historia Natural quedó en manos de su hijo Alexandre Edmond, quien había sido su compañero inseparable y su asistente. Alexandre nació en 1820 en París, Francia: en 1849 fue profesor del Instituto de Agronomía de Versailles y desde 1853 del Conservatorio de Artes y Oficios. El segundo científico de la familia Becquerel se interesó en el estudio de la luz, investigó el efecto fotoeléctrico [*se conoce como efecto fotoeléctrico a la emisión de electrones en un material que ha sido irradiado, por ejemplo, con un haz de luz*] y las características espectroscópicas [*estas son las que se refieren a la emisión o absorción de las radiaciones por la materia*] de la luz solar y de la luz eléctrica, así como el fenómeno de la fosforescencia, propiedad que tienen algunas sustancias de emitir luz propia en la obscuridad después de haber sido expuesta una fuente de luz y el material expuesto a ella, así como observar los efectos resultantes.

En 1867-1868 publicó su libro en dos volúmenes: *Luz, sus causas y efectos*. También investigó las propiedades magnéticas [*las propiedades magnéticas son las que se refieren a la forma en la que los campos de fuerza magnética afectan las diferentes sustancias*] y paramagnéticas [*las propiedades paramagnéticas son propiedades magnéticas que se deben al spin (giro) del electrón a los materiales que contienen electrones no apareados. Su medida suministra información sobre los enlaces químicos*] de las sustancias y los fenómenos de la descomposición electroquímica y propuso una modificación a la Ley de Faraday [*Michael Faraday (1791 - 1867) dedujo que un proceso electrolítico, la cantidad de cambio químico que se produce depende de la carga eléctrica aplicada y de la masa y de la carga del ion involucrado*], tendiente a explicar algunos casos excepcionales.

Antoine Henri, hijo de Alexandre, fue el tercer miembro de la familia que hizo historia por sus brillantes descubrimientos. Nació en París, el 15 de diciembre de 1853, y llevó a buen término sus estudios, al igual que su abuelo y su padre, en la Escuela Politécnica. En 1875 inició su actividad profesional en el Departamento de Puentes y Caminos, del que llegó a ser jefe de ingenieros en 1894. Dos años antes, cuando su padre murió, Antoine había ocupado la plaza de profesor de física en el Museo de Historia Natural de París. A Antoine le interesó el magnetismo, la polarización la [*polarización es la propiedad que presenta un rayo luminoso, después de sufrir la reflexión o la refracción, de producir vibraciones localizadas desigualmente en las cercanías del haz*] de la luz, la fosforescencia y la absorción de la luz en los cristales, y fueron los experimentos realizados en estos últimos campos los que lo llevaron al descubrimiento de la radiactividad natural. Murió en Croisic, Francia, el 25 de agosto de 1908, después de haber recibido numerosos y muy merecidos honores, entre ellos el premio Nobel de física en 1903, compartido con los esposos Curie.

Jean, hijo de Antoine Henri, egresó de la misma escuela que sus antecesores y después impartió física en la misma institución. Prosiguió algunos de los trabajos de su padre y también realizó investigaciones sobre las propiedades

ópticas y magnéticas de los cristales a muy bajas temperaturas. Descubrió la polarización circular, que consiste en que el plano de polarización gira uniformemente en torno al eje, a medida que avanza el rayo, y publicó varios artículos sobre la relatividad y las transmutaciones de los elementos.

LOS EXPERIMENTOS DE A. H. BECQUEREL

Antoine continuó los estudios que había iniciado junto con su padre sobre el fenómeno de la fosforescencia en el sulfato doble de uranio y potasio. Su experimento fue sencillo: expuso a la luz del Sol una muestra de esta sal de uranio colocada sobre una placa fotográfica [una placa fotográfica es un material que está recubierto por una sal (cloruro o bromuro) de plata. Se dice que una placa se vela cuando, al incidir sobre ella algún tipo de radiación, la placa se oxida y se ennegrece, manifestándose así la incidencia de esa radiación] envuelta en dos hojas de papel negro grueso, tan opaco a la luz que aun después de un día de exposición a la luz solar no podía velarse.

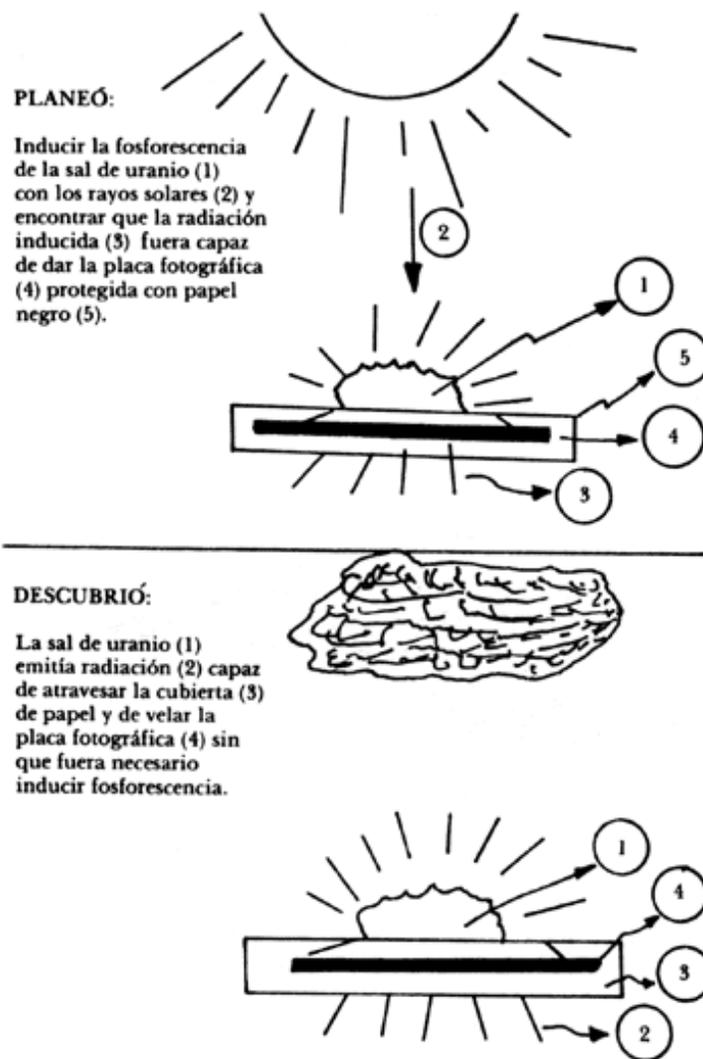


Figura I.1. el experimento de A. E. Becquerel.

Becquerel presentó una breve nota, en la que describió sus experimentos, en la sesión del 24 de Febrero de 1896 de la Academia de Ciencias de París, de la cual era miembro desde 1889. Quiso verificar después sus observaciones y preparó de nuevo algunas placas fotográficas junto con su sal de uranio. Para su fortuna, tal como se dice ahora, o para su desdicha como quizá se dijo él mismo, todos los días que siguieron fueron nublados, así es que Antoine guardó sus placas con las sales de uranio, en espera de días mejores. ¡Cual no sería su sorpresa cuando descubrió que las placas fotográficas estaban veladas en la zona expuesta a las sales de uranio! Normalmente, las placas hubieran sido desechadas, pero el descubrimiento de los rayos X por Roentgen, apenas semanas antes, lo puso sobre aviso. En la sesión de la Academia, celebrada una semana después de la anterior, el 2 de marzo, Becquerel informó sobre sus avances: estaba seguro de que el efecto logrado en placas fotográficas era independiente del fenómeno de

la fosforescencia (véase la figura I.1). Ese día hizo referencia a las "radiaciones activas", fijando así las bases del término que posteriormente establecería Marie Curie: radiactividad.

El 18 de mayo de 1896, Becquerel dio a conocer ante sus colegas que todos los compuestos del uranio, fueran o no fosforescentes, así, como el mismo uranio, presentaban el fenómeno descubierto esto es, emisión de radiación que se parecía en algunos aspectos a los rayos X de Roentgen. Sus estudios lo llevaron a concluir que el uranio puro producía efectos de radiación más intensos que los compuestos y, que al igual que los rayos X, esos rayos poseían la propiedad de descargar cuerpos electrizados; esta propiedad fue y sigue siendo la base de la mayoría de los métodos de detección de las sustancias radiactivas.

Tal como lo veremos a lo largo de este capítulo y de los siguientes, a partir de entonces la curiosidad de los investigadores se orientó hacia el descubrimiento de otras sustancias que también tuvieran propiedades radiactivas, a la identificación de sus radiaciones e incluso a la búsqueda de las aplicaciones de esos conocimientos.

PIERRE CURIE Y MARIE SKLODOWSKA

Pierre Curie nació en París, Francia, el 15 de mayo de 1859. Hijo de un médico, Eugéne Curie, Pierre creció en un ambiente familiar que le permitió desarrollar sus aptitudes de observación y de reflexión sobre los fenómenos naturales. Esta educación produjo pronto sus frutos: fue bachiller a los 16 años, licenciado en física a los 18 y, a los 19, ayudante de laboratorio del profesor Desains, en la Universidad de París, La Sorbona. Con la ayuda económica que le proporcionaba su modesto sueldo, pudo dedicarse a lo que más anhelaba: la investigación científica y, junto con su hermano Jacques, que también era físico, pronto anunció el descubrimiento del fenómeno de *[la piezoelectricidad es el conjunto de fenómenos eléctricos que se manifestaban en un cuerpo sometido a presión o a deformación]* y el cuarzo piezoeléctrico. Así se logró medir con precisión pequeñas corrientes eléctricas, lo que, desde luego, fue de gran utilidad para sus trabajos posteriores sobre la radiactividad.

En 1882 dejó La Soborna para trabajar como jefe de laboratorio en la Escuela de Física y Química de París. Allí continuó sus importantes descubrimientos: citaremos, entre otros, lo que ahora se conoce, como la ley de Curie *[la ley de Curie se refiere a que la susceptibilidad (relación entre la magnetización de una sustancia y la intensidad del campo magnético aplicado) de ciertas sustancias paramagnéticas es inversamente proporcional a la temperatura termodinámica, también llamada absoluta]* sobre magnetismo.

A pesar del gran entusiasmo con que Pierre Curie realizaba sus investigaciones, no mostraba interés alguno por obtener títulos ni honores: sin embargo, en 1895 y debido a la insistencia de su padre, Pierre presentó la tesis doctoral, basada en sus investigaciones sobre el magnetismo.

Fue en 1894 cuando Pierre conoció a Marie Sklodowska, quien entonces estudiaba en La Soborna y que poco tiempo después sería conocida como la señora Curie.

Marie Sklodowska nació en un antiguo barrio de Varsovia, Polonia, el 7 de noviembre de 1867; su madre había sido directora de una escuela para señoritas y su padre era profesor de física y de matemáticas. Marie fue una niña muy precoz y sensible que desde pequeña sufrió la opresión zarista. En esa época el idioma ruso era el único permitido en Polonia y Marie lo hablaba perfectamente, al igual que el polaco, su idioma materno. Como la mayoría de sus compatriotas, soñaba con la libertad de su patria y deseaba servirla, lo que la condujo a participar en una organización revolucionaria de estudiantes. Debido a ello su padre consideró prudente que pasara algunos meses con unos parientes en el campo.

La situación económica de la familia Sklodowska no era solvente y por eso Marie decidió, desde los 18 años, trabajar como institutriz y así ayudar a su hermana Bronia que deseaba estudiar medicina en París. Seis años más tarde, en 1891, ella misma se trasladó a París e ingresó en La Sorbona. A pesar de sus muchas limitaciones económicas, Marie obtuvo su licenciatura en ciencias físicas en 1893 y en ciencias matemáticas en 1894. Fue en ese tiempo cuando Pierre Curie y ella contrajeron matrimonio.

UNA COLABORACIÓN CIENTÍFICA

Los descubrimientos de Antoine Henri Becquerel interesaron mucho a los esposos Curie, especialmente a Marie, quien buscaba en ese entonces un tema para desarrollar su tesis doctoral. Pierre continuó con sus proyectos de investigación, mientras Marie empezó a buscar la radiactividad natural en diversos compuestos, con el propósito de encontrar en la naturaleza otros elementos radiactivos además del uranio. Y en efecto, descubrió que existía otro elemento que emitía también radiaciones: el torio. Las propiedades radiactivas de este elemento fueron descubiertas simultáneamente por el alemán Gerhard Schmidt. Marie presentó un informe en el que hacía constar que todos los compuestos de uranio y de torio que había examinado eran radiactivos y, continuando sus investigaciones, ya no solamente sobre compuestos puros sino también sobre diversos minerales de uranio y de torio, encontró con gran sorpresa que, en algunos de esos minerales, la emisión de rayos era mucho más intensa que en los compuestos puros. Este descubrimiento la hizo pensar en la existencia de otro elemento capaz de emitir rayos.

Pierre y Marie Curie utilizaron tres pequeñas libretas forradas, de papel negro para anotar los experimentos que iban realizando. Años después, esas libretas le sirvieron a Irene Joliot-Curie para seguir el desarrollo del trabajo de sus padres, aun cuando los experimentos y los resultados no hubiesen sido anotados a diario.

La primera libreta fue iniciada el 16 de Septiembre de 1897 por Pierre Curie, quien se refería principalmente al estudio de las propiedades termoeléctricas [*las propiedades termoeléctricas se refieren a la energía que se produce por la conversión de calor*] en cristales ,de pirita [*se conoce con el nombre de pirita a los sulfuros minerales de los metales como el hierro*]. El 16 de diciembre Marie también comenzó a hacer anotaciones sobre sus trabajos sobre la radiactividad del uranio. La mayor parte del cuaderno está escrito por ella, con notas ocasionales al margen de la mano de Pierre, como algunas cifras a alguna curva, lo que quiere decir que seguía muy de cerca los progresos del trabajo.

Los cuadernos contienen muy poco texto, tratan sobre la naturaleza del producto detectado y las modificaciones experimentales que se realizaron. Casi no hay títulos que indiquen nombre del experimento y rara vez una frase que de cuenta del resultado. Eso si existen descripciones detalladas de tratamientos químicos y aspectos de los productos obtenidos. Todos esos estudios eran tan prometedores que los esposos Curie decidieron continuarlos juntos y es así como se inicia una de las colaboraciones científicas más destacadas de la historia.

Pierre y Marie tenían los mismos intereses tanto en su vida privada como en el trabajo. Los dos disfrutaban de los paseos a pie o en bicicleta en las cercanías de París y a veces en sus vacaciones iban a la playa o a la montaña. Los Curie también compartieron su amor por la ciencia y se dedicaron con gran entusiasmo y éxito a las investigaciones sobre la radiactividad natural y a la enseñanza.

A partir del 18 de marzo de 1898, Pierre Curie se dedicó por completo al estudio de la radiactividad. Ya en la segunda y tercera libretas de apuntes de los Curie se observa indistintamente la letra del uno y del otro. Marie Curie escribía de una manera clara y nítida sus medidas se encuentran bien ordenadas en columnas. Pierre Curie, en cambio, lo hacía con letra pequeña, desordenadamente. Contra lo que cree se ocupaba tanto del trabajo químico como de las medidas físicas, pues un gran número de las anotaciones que se encuentran en los esquemas de tratamiento son de su puño y letra.

EL POLONIO Y EL RADIO

Cuando los Curie empezaron a trabajar con la pechblenda pudieron darse cuenta de que las emanaciones de ese mineral eran casi tres veces más intensas que las del uranio, de manera que emprendieron la búsqueda de las causas de esa actividad excesiva. Después de haber separado las sustancias no radiactivas de la pechblenda, obtuvieron un producto cuya radiactividad era aproximadamente 400 veces superior a la del uranio y cuyas propiedades se parecían a las de otro elemento: el bismuto. Supusieron entonces que la pechblenda podría contener un elemento nuevo y, efectivamente, ese producto contenía un elemento químico desconocido hasta entonces, al que los Curie llamaron polonio en honor de la patria de Marie. Este importante hallazgo lo realizaron en el mes de julio de 1898. El polonio, aislado en esa ocasión como un sulfuro, fue el primer elemento químico descubierto gracias a sus propiedades radiactivas.

Los Curie observaron también que las radiaciones emitidas por los compuestos de polonio y de radio hacían fosforescente al platino-cianuro de bario: es decir que su acción era análoga a la de los rayos de Roentgen pero considerablemente más débil. Para hacer el experimento colocaron sobre la sustancia radiactiva una hoja muy delgada de aluminio, recubierta con una capa fina de platino-cianuro de bario y en la oscuridad notaron que este

último brillaba ligeramente. En ese momento no les fue posible interpretar sus observaciones porque la existencia de una fuente luminosa que funcionara sin una fuente de energía se contraponía con el principio de Carnot [*Sadi Carnot, en 1824 había concluido que para que toda una máquina térmica funcionando en un ciclo de transformaciones es absolutamente necesario disponer de dos fuentes, una que ceda el calor al fluido de contacto y otra que lo reciba. Carnot quiso decir también con esto que es imposible crear una máquina tal que en su mecanismo utilice solamente una de esas fuentes*].

Con el uranio y el torio, los Curie no observaron el brillo del platino-cianuro de bario y concluyeron que al igual que con las placas fotográficas, la acción de dichos elementos era más débil que la del polonio y el radio. Tendrían que realizarse todavía muchos estudios, para comprender completamente esos fenómenos (véanse más adelante las investigaciones realizadas por Ernest Rutherford).

Al continuar sus investigaciones, los esposos Curie encontraron que la pechblenda contenía otro producto, con una actividad 900 veces más intensa que la del uranio y cuyas propiedades químicas eran completamente diferentes a las del polonio. La segunda sustancia radiactiva que encontraron tenía toda la apariencia química del bario y la denominaron *radio*.

La nueva sustancia radiactiva estaba mezclada con una considerable proporción de bario, y a pesar de esto, su radiactividad era intensa. Con los conocimientos actuales, se puede inferir que en las primeras muestra de la radiactividad del radio debió ser enorme. En diciembre del mismo año, 1898, los Curie lograron separar el radio del bario, utilizando la diferencia de solubilidad entre los cloruros de uno y otro elementos.

Por los experimentos de Becquerel, los esposos Curie ya sabían que los elementos radiactivos y sus compuestos tenían la propiedad de ionizar [*ionizar es producir partículas dotadas de carga eléctrica a partir de la pérdida o ganancia de electrones de una sustancia*] el aire así convertirlo en conductor de la electricidad. Y, además, que al poner estos elementos en contacto con placas fotográficas sensibles, las velaban. Al medir esas propiedades, los esposos Curie encontraron que el polonio y el radio eran considerablemente más radiactivos que el uranio y el torio, pues sobre todas las placas fotográficas obtuvieron buenas impresiones con el radio y el polonio en medio minuto de contacto y necesitaron varias horas para obtener el mismo resultado con el uranio y el torio.

Para determinar la masa atómica [*se define como masa atómica la relación entre el promedio de la masa de un elemento en estado natural y la doceava parte de la masa del carbono-12*] del radio y sus propiedades era necesario extraerlo a partir de una gran cantidad de pechblenda: tarea gigantesca que involucraba un sin número de problemas.

Los experimentos que condujeron al descubrimiento del polonio y el radio se realizaron en la Escuela de Física y Química y en la Escuela de Ingenieros, donde Pierre Curie enseñaba. Sin embargo, no había en esas escuelas laboratorios adecuados para estas investigaciones, así que se llevaron a cabo siempre en condiciones materiales muy precarias. Más tarde, cuando los Curie empezaron a efectuar tratamientos químicos en gran escala, el director de la Escuela de Física y Química les permitió utilizar un cobertizo, amueblado solamente con mesas de madera, donde entraba el agua de lluvia por todas partes y la calefacción no era suficiente, pero donde tenían por lo menos espacio suficiente para trabajar.

Con la cooperación de la Academia de Ciencias de Viena y del gobierno austriaco, Pierre y Marie consiguieron una tonelada de desechos del mineral de pechblenda proveniente de las minas de San Joachimsthal, situadas en la región de Bohemia, Checoslovaquia. Ya se había indicado antes que en ese entonces, el uranio se utilizaba principalmente como colorante de cerámicas. En esos desechos ya no había uranio, pero se encontraban otros elementos. Con los desechos de ese mineral, Marie efectuó manipulaciones muy difíciles, pues en ocasiones manejaba hasta 20 kilogramos de materia prima.

Los Curie lograron recuperar un décimo de gramo de cloruro de radio a partir de una tonelada de residuos de pechblenda. El proceso era tan laborioso que fue hasta 1902 cuando tuvieron la cantidad suficiente del elemento para determinar su masa atómica y otras propiedades. El mundo científico, que al principio había visto con escepticismo el descubrimiento del radio, se rendía ante la evidencia y lo aceptaba.

Desde septiembre de 1897, la familia Curie contó con un nuevo miembro, su hija Irene, de manera que cuando los esposos Curie regresaban a casa convivían con su hija mientras trabajaban en la interpretación teórica de los resultados obtenidos en el laboratorio. En 1904 celebraron el advenimiento de su segunda hija, Eve, y un año más

tarde Pierre y Marie tuvieron la tristeza de perder al que hubiera sido su tercer hijo.

En el año de 1900, Pierre Curie había sido nombrado profesor de La Sorbona y Marie instructora de la Escuela Normal Femenina de Sèvres. En junio de 1903 Marie obtuvo su doctorado, con la tesis intitulada "Investigaciones sobre las sustancias radiactivas" y en 1904 La Sorbona creó una cátedra de física especialmente para Pierre. La vida de los Curie se desarrollaba entonces en armonía, tanto el trabajo como en el hogar.

Pierre murió en París el 19 de abril de 1906, en un accidente, y Marie completó la obra emprendida por ambos. Con tesón admirable continuó sus investigaciones y tomó el lugar que había dejado su esposo, tanto en el hogar como en La Sorbona pues desde ese mismo año empezó a dar las cátedras que el impartía, y así tuvo el honor de ser la primera profesora de esa Universidad.

LA VIUDA CURIE

En 1910, Marie publicó su obra *Tratado de radiactividad*, y en 1911 logró purificar aun más al radio, trabajo que requirió de mucho tiempo y habilidad.

La unidad de radiactividad, el curie, fue denominada así en homenaje a Marie, en uno de los Congresos Solvay efectuados en Bruselas, donde se llegaron a reunir todos los grandes científicos de la época. Después, en 1950, la Comisión Unificada de la IUPAP (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) y la IUPAC (Unión Internacional de Física Pura y Aplicada), indicó que: "El curie es la unidad de radiactividad definida como la cantidad de cualquier núclido radioactivo en el cual el número de desintegraciones por segundo es 37 000 000 000". Este valor equivale a la cantidad de emanación en equilibrio de un gramo de radio: así había sido explicado por Marie Curie antes de ceder a la Oficina Internacional de Pesos y Medidas 21 mg de radio que ella misma había obtenido y purificado. Desde hace algunos años y para simplificar el uso de las unidades de radiactividad, el máximo organismo mundial sobre metrología designó al becquerel (una desintegración por segundo) y al rutherford (un millón de desintegraciones por segundo) como las unidades que deben emplearse.

Ya se han mencionado algunos de los reconocimientos que el mundo le concedió a madame Curie a lo largo de su vida, pero no obstante su prestigio, sufrió el rechazo de la Academia de Ciencias Francesa. Al deceso del físico Gernez, solicitó la vacante en dicha Academia, pero en reñida votación, en enero de 1911, el puesto fue concedido a Eduard Branly, el inventor del telégrafo inalámbrico. La población de la Academia Francesa se mantuvo masculina hasta 1966, año en que por primera vez se aceptó a una mujer como miembro. Ese honor correspondió a una discípula de Marie: Marguerite Perey, descubridora del francio. Pero también algunos hombres ilustres fueron rechazados por la Academia, y basta mencionar a Balzac, a Zola y al mismo Pierre Curie.

En ese mismo año de 1911, Marie viviría momentos cruciales para su vida. En septiembre se vio envuelta en un escándalo muy desagradable: la aparición en la prensa parisina de su correspondencia con Paul Langevin en la cual se ponía de manifiesto que las relaciones intelectuales que mantenían desde varios años atrás habían llegado también a ser amorosas. Marie era viuda, pero Paul estaba casado y la sociedad francesa la juzgó duramente. Los contratiempos en su vida personal y profesional de esos meses se vieron quizá compensados con la obtención en ese mismo año del premio Nobel de química, por la determinación de la masa atómica de radio.

A lo largo de varios años, Marie luchó con ahínco por tener un laboratorio que respondiera a las necesidades de sus investigaciones. Por fin en 1914 se terminó la construcción del Instituto del Radio, de la Universidad de París, pero en ese mismo año estalló la primera Guerra Mundial y la inauguración tuvo que esperar hasta el armisticio.

Dado su carácter, no es de extrañar que durante la guerra participara con una fuente portátil de radio para hacer radiografías de los huesos de los heridos era similar a la actual con los rayos X.

En el Laboratorio Curie del Instituto del Radio se hicieron trabajos de gran prestigio, entre ellos cabe mencionar el descubrimiento del francio, por Marguerite Perey y el de la radiactividad artificial, por Irene Curie y su esposo Frederic Joliot. Entre 1919 y 1934 fueron publicados 483 informes científicos provenientes del Instituto, 31 eran de Marie.

Madame Curie murió a la edad de 66 años, el 4 de julio de 1934 en Valence, Francia, y fue enterrada junto a Pierre en el cementerio de Sceaux.

¿Y POR QUÉ LA PECHBLENDA?

Al paso de los años han podido esclarecerse las razones por las cuales Becquerel observó la "radiación uránica" y los Curie descubrieron al polonio y al radio en la pechblenda y aun en los desechos del tratamiento de ese mineral.

La pechblenda es una especie mineral, también denominada uraninita, en la que existen básicamente óxidos de uranio y es hasta ahora el mineral más rico en ese elemento. Su nombre proviene de la palabra griega $\pi\iota\tau\tau\alpha$ = pez (substancia negra, pegajosa) y la alemana *blind* = ciego, engañoso, que aluden al color del mineral y a que tiene la apariencia de la galena [la galena es una forma mineral del sulfuro del plomo divalente. Es la principal fuente de plomo] sin serlo. En México existe en los estados de Chihuahua y Oaxaca, principalmente. La pechblenda es un material radiactivo, pues lo son tanto el constituyente principal (el uranio) como algunos de sus demás componentes.

Los núcleos de los átomos del elemento uranio están constituidos por 92 partículas que tienen carga eléctrica positiva (protones) y contienen además partículas neutras (neutrones). Para la mayoría de los átomos de dicho elemento que se encuentra en la naturaleza, el número de neutrones es 146. Estos núcleos se denominan de uranio-238, porque 92 más 146 es igual a 238.

El uranio-238 tiene una vida media [la vida media es el tiempo que transcurre para que la radiactividad de una sustancia llegue a ser la mitad de su valor original (véase la figura I.2)] enorme, de 4 500 millones de años, por lo que se le considera como una sustancia radiactiva primaria [las sustancias radiactivas primarias son aquellas que tienen un tiempo de vida media muy largo, comparado con la edad de la Tierra, y por ese motivo, aunque existen desde la formación del planeta, todavía quedan en cantidades apreciables]. Es el origen o padre de una familia numerosa véase la figura I.3) en la cual, con la excepción del último integrante que se considera estable, todos los demás emiten radiaciones nucleares, es decir, son sustancias radiactivas secundarias [las sustancias radiactivas secundarias son las que tienen vidas medias muy cortas, pero como se originan por el decaimiento de las primarias, se están formando continuamente y por esa razón es posible encontrarlas en la naturaleza].

La inestabilidad de los núcleos provoca la emisión de varios tipos de radiación. Más adelante, en el capítulo referente a los descubrimientos de Rutherford y la escuela inglesa, se encontrará una explicación amplia sobre ellos, pues fue él quien logró identificar lo que en un principio Becquerel denominó radiación uránica. Por el momento nos limitaremos a mencionar que existen las radiaciones alfa, beta y gamma.

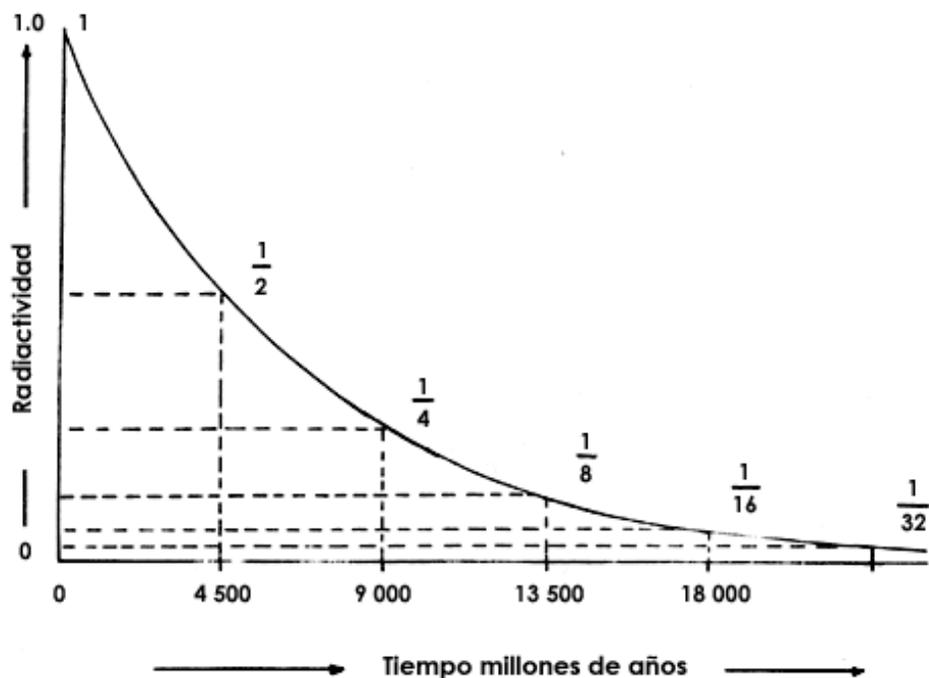


Figura I.2. Curva de desintegración del uranio-238. Cada vez que transcurren 4 500 millones de años, la radiactividad se reduce a la mitad.

número atómico y nombre del elemento	Isótopos que integran la familia. (Entre paréntesis, los valores de sus vidas medias)			
92 Uranio	U - 238 (4.5 x 10 ⁹) años		U - 234 (2 x 10 ⁵) años	
91 Protactinio		Pa - 234 m (1.2 minutos)	Pa - 234 (6.7 hrs.)	
90 Torio	Th - 234 (24 días)		²³⁰ Th - 230 (7.5 x 10 ⁴) años	
89 Actinio				
88 Radio			Ra - 226 (1622 años)	
87 Francio				
86 Radón			Rn - 222 (3.8 días)	
85 Astatinio			At - 218 (1.3 seg.)	
84 Polonio		PO - 218 (3 minutos)	Po - 214 (0.0002) segundos	Po - 210 (138 días)
83 Bismuto			Bi - 214 (19.7) minutos	Bi - 210 (5 días)
82 Plomo		Pb - 214 (26.8) minutos	Pb - 210 (22 años)	Pb - 206 (isótopo) estable
81 Talio			Tl - 210 (1.3) minutos	Tl - 206 (4.3) minutos
80 Mercurio			Hg - 206 (8.5) minutos	

α: Decaimiento alfa
β: Decaimiento beta
γ: Decaimiento gamma

Figura I.3. La familia del uranio-238. También se denomina $4n+2$, porque los números de masa de los integrantes pueden restarse de 2 unidades y dividirse entre 4, para dar un valor llamado n , el cual disminuye desde 59 para el uranio-238: $(4 \times 59) + 2 = 238$, hasta 51 para el plomo-206: $(4 \times 51) + 2 = 206$.

Ahora bien, los núcleos de los átomos del uranio-238 son capaces de desprenderse, en una sola emisión, de dos protones y dos neutrones, que forman una entidad que se denomina partícula alfa o radiación alfa. Después de la emisión, el núcleo remanente posee 90 protones y 144 neutrones, se denomina torio-234 y sus propiedades físicas y

químicas son completamente diferentes de las de su padre (véase la figura I.2). La vida media del torio-234 es solamente de algunos días y la radiación emitida es beta, es decir, partículas ligeras de carga negativa, similares a los electrones que circundan al núcleo, sólo que la radiación beta proviene del interior de aquél. Esa emisión equivale a la pérdida de una partícula neutra (neutrón) y la ganancia de un protón. El nuevo núcleo tiene entonces 91 protones y 143 neutrones y es diferente de sus dos predecesores: se trata del protactinio-234, emisor beta de vida muy corta. Por su emisión, el número de protones y neutrones vuelve a cambiar y llega a ser 92 y 142. El elemento que posee 92 protones ya lo hemos visto, es el uranio: sólo que en este caso, la suma de $92 + 142 = 234$ y se denomina uranio-234. Esta entidad se comporta químicamente igual que el padre de la cadena (uranio-238), pero sus propiedades nucleares son distintas (por ejemplo, en la figura I.1 las vidas media de uno y otro). Cuando dos entidades tienen el mismo número de protones y diferentes números de neutrones, como el uranio-234 y el uranio-238, se dice que son isótopos de un mismo elemento.

El uranio-234 forma por decaimiento alfa al torio-230 y éste a su vez al radio-226 y así sucesivamente.

Es importante mencionar aquí que los valores de las vidas medias no solamente son responsables de la desaparición de una especie radiactiva, sino también de su formación, de tal manera que en su momento dado puede alcanzarse un equilibrio [*el equilibrio de un sistema es el estado en el cual sus propiedades no se alteran con el tiempo*]. Así, si la vida media del padre es muy larga y la del hijo es corta, éste tiene en principio grandes probabilidades de formarse y de desaparecer, hasta que llega un momento en que establece el equilibrio y padre e hijo coexisten, lo que equivale a decir que el hijo sobrevive con la vida media de su padre. En el caso particular del uranio-238, cuya vida media es inmensa, y de su hijo el torio-234, de vida media corta, se establece sin equilibrio que se denomina secular.

Supongamos que por un proceso químico se logra separar al uranio de todos los integrantes de su familia radiactiva, que inmediatamente se mide la radiactividad (tiempo=0) y que ésta es igual a 10 000 desintegraciones por minuto. Si después de 80, 160, 240 o 320 días se repite la medición de radiactividad del uranio-238, hallaremos valores muy similares, porque su vida media es tan larga (4 500 000 000 de años) que en un año no es posible apreciar su decaimiento. Lo anterior se halla representado en la figura con la línea pespunteada. Si en la muestra se mide desde tiempo = 0 y diariamente la radiactividad del hijo radiactivo, el torio-234 de 24 días de vida media, se aprecia que esta aumenta gradualmente (línea llena en la figura I.4) hasta que después de 160 días prácticamente el número de sus desintegraciones por minuto llega a ser de 10 000, el mismo valor que el de su padre y además entonces el torio-234 no decae con su propia vida media, sino que se mantiene en equilibrio con su padre.

Cuando padre e hijo tienen vidas medias muy largas, el equilibrio puede tardar muchísimo tiempo y, prácticamente, durante la vida de un ser humano, no se aprecia la formación del hijo. Por ejemplo, para que el torio-230 se ponga en equilibrio con su padre el uranio-234 debe transcurrir casi medio millón de años. Sin embargo, en un mineral muy antiguo como la pechblenda, el uranio-238 tuvo tiempo suficiente para que toda su descendencia alcanzara el equilibrio radiactivo, lo que equivale a decir que todos decaen con la vida media del uranio-238 y que coexisten. Cuando el mineral se procesa químicamente para separar al uranio, el uranio-238 forma, con relativa rapidez, al torio 234, al protactinio-234 y al uranio-234, pero ningún otro miembro de la familia se puede observar en mucho tiempo. Por esa razón los Curie observaron diferencias en la intensidad de la radiación que tenían las sales y los minerales de uranio. En las primeras sólo estaban presentes los primeros cuatro integrantes de la familia radiactiva, mientras que en el mineral se encontraba al uranio con toda su progeñe.

Ahora bien, el uranio tiene un comportamiento químico diferente del de los otros elementos que integran su familia radiactiva y cuando se separa del mineral, los demás quedan en los desechos. Por eso los Curie lograron encontrar al polonio y al radio en los desechos que consiguieron. Estos elementos son muy poco abundantes en la naturaleza: tan solo se encuentran 7.4 millonésimas de gramo de polonio y 340 miligramos de radio por cada tonelada de uranio, de allí que Marie necesitara de varias toneladas de material para obtener cantidades ponderables de esos elementos.

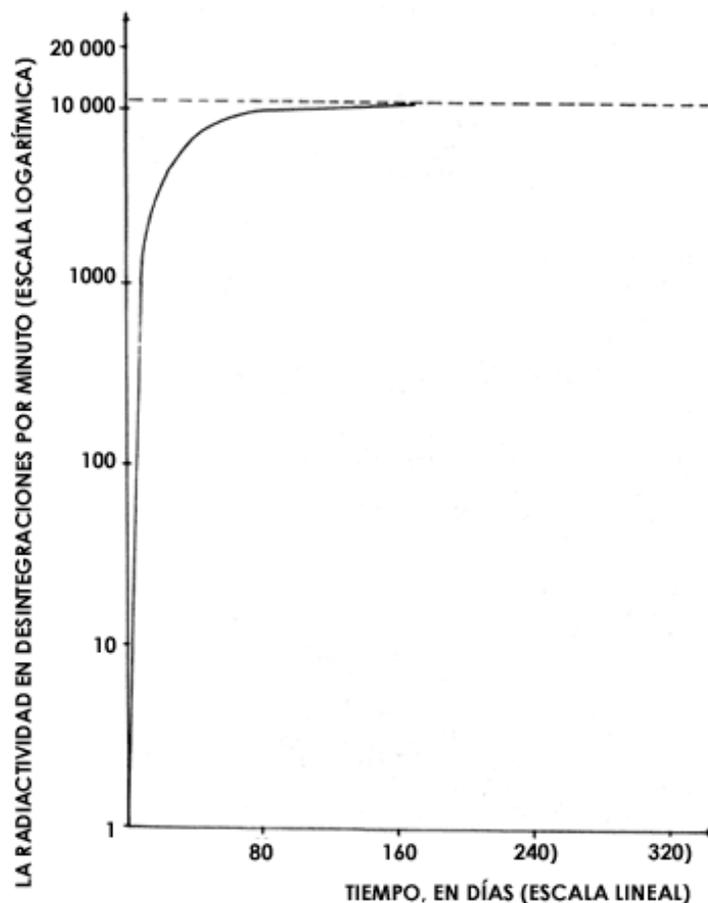


Figura I.4. ejemplo del equilibrio secular, en el vida media del padre es mucho mayor que la del hijo.

- - - línea correspondiente al padre: uranio-238 (vida media: 4 500 millones de años).

— línea correspondiente al hijo. Torio-234 (vida media: 24 días).

La familia del uranio-238 (figura I.1) está integrada por los siguientes elementos químicos: uranio, protactinio, torio, radio, radón, astato, polonio, bismuto, plomo, talio y mercurio. Los Curie lograron encontrar en esos desechos al polonio y al radio pero fueron otros los que descubrieron al protactinio (Fajans y Gohring 1913), al radón (Dorn 1900) y al astato (1940). Los demás ya habían sido identificados, algunos desde la antigüedad, pero fue ya en el transcurso del siglo XX cuando pudieron establecerse las relaciones radiactivas que existen entre ellos.

BIBLIOGRAFÍA

W. B. Mann y S. B. Grfinkel. *Radiactividad y su medida*, 1a. ed. en español, Editorial Reverté Mexicana, México, 1968.

J. E. Greene, *Cien grandes científicos* 1a. ed. en español, 10a. impresión Editorial Diana, México, 1981.

Accolade Books, *Enciclopedia biográfica Universal*, volumen III, Promociones Editoriales Mexicanas S.A. de C.V. México, 1982

B. Bensaude-Vincent, La genese du tableau de Mendeleev, *La Recherche* 15, 1206, 1984

Encyclopaedia Británica, vol. 3, p. 292, 1990.

The New Capton Encyclopedia, vol. 2. The Caxton Publ. Col. Ltd., 1966.

E. Schimitter-Villada, R. Martin del Campo de Schimitter, *Glosario de Especies Minerales*, UNAM, México, 1980.

F. Giroud, *Une femme honorable*, Fayard, París, 1981.

S. Bulbulian, *La radiactividad*, Colección "La Ciencia desde México", núm. 42, Fondo de Cultura Económica, México, 1987.

M. Solache-Ríos, "La radiactividad natural", *Ciencia y Desarrollo*, núm. 48,16, 1983.

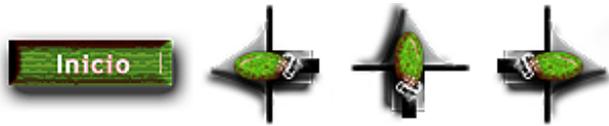
S. Bulbulian, M. Jiménez-Reyes, "Pierre y Marie Curie", en *Naturaleza*, 3, 179,1979.

E. G. León López, *Henri Antoine Becquerel*, Ed. Limusa, México, 1988.

S. Bulbilian S. Fernández-Valverde, "Frederic e Irène Joliot-Curie", en en *Ciencia y Desarrollo*, núm. 48, 9, 1983.

Diccionario de química. Colección "Llave de la Ciencia"; Dir.: J. Daintith, Edinorma S.A., Bogotá, 1985.

Diccionario de física, Colección "Llave de la Ciencia", Dir.: J. Daintith, Edinorma S.A., Bogotá. 1984.



II. LA ESTRUCTURA DEL ÁTOMO

MARCOS SOLACHE-RÍOS

MELANIA JIMÉNEZ-REYES

EL ATOMISMO

DESDE hace muchos siglos el hombre sospechó que el mundo físico se hallaba formado por partículas invisibles al ojo humano y, según consideraron algunos pensadores de la antigua Grecia, indivisibles. Debido a esta última cualidad esas partículas recibieron el nombre de átomos, término griego que significa "lo que no se puede dividir".

Atomismo, en sentido amplio, es cualquiera doctrina que explique los fenómenos naturales tomando como base la existencia de partículas indivisibles. Por el contrario, las teorías denominadas holísticas explican las partes por referencia al todo.

La teoría atomista fue desarrollada en el siglo V por Leucipo de Mileto y su discípulo Demócrito de Abdera. Demócrito aseguraba que todo se compone exclusivamente de átomos y vacío.

El filósofo ateniense Epicuro (siglos IV-III a. C.) y el poeta latino Lucrecio, dos siglos después, asignaron a los átomos la propiedad del peso y postularon la división del átomo en partes mínimas.

La doctrina atomista tuvo escasa repercusión en la Edad Media debido a la preminencia de las ideas holísticas de Platón y Aristóteles.

Ya en el siglo XIX, el químico inglés John Dalton estableció la denominadas leyes estequiométricas (relativas a las proporciones y relaciones cuantitativas que rigen las reacciones químicas) y aseguró que estas incluían la relación de números enteros simples en las reacciones químicas. También en esa época Robert Boyle y Edmé Mariotte habían enunciado las leyes de los gases referentes a las relaciones entre el volumen y la presión. El hecho de que los gases pudieran comprimirse hasta límites máximos al aumentar la presión indicaba que sus constituyentes se hallaban separados por grandes distancias y dejaban huecos entre ellos. Es decir que la materia, aun siendo sometida a grandes presiones, no era continua. Todos estos fenómenos sólo hallaban explicación en la teoría atómica.

EL ELECTRÓN

A fines del siglo XIX las condiciones estaban ya dispuestas y se empezaron a abrir las puertas para escudriñar la estructura del átomo. Y fue el corpúsculo ahora denominado electrón el primero de los constituyentes atómicos que pudo ser identificado por J.J. Thomson en 1897.

Joseph John Thomson nació el 18 de diciembre de 1856 en Cheetam Hiel, cerca de Manchester, Inglaterra. Hijo de un vendedor de libros, fue de niño lector insaciable y magnífico estudiante. A los 20 años, él joven ingeniero Thomson obtuvo una beca para estudiar física y matemáticas en la Universidad de Cambridge y, acogido por el Trinity College, se inició como estudiante y llegó a ser, años más tarde, el director. Lord Raleigh (1842-1919), que era director de los famosos laboratorios Cavendish de la Universidad de Cambridge, designó como su sucesor, en 1884, a Thomson, quien demostraría con creces y a lo largo de 35 años lo atinado de la elección, pues contribuyó a desarrollar uno de los mayores laboratorios de investigación que atrajo a científicos de todo el mundo. Allí conocería a quien fue desde 1890, su esposa: Rose Elizabeth Paget, hija de sir George y lady Paget. Rose y Joseph serían a su vez padres del laureado Nobel de 1937 en física: Georges Paget Thomson.

En la década de los años ochenta del siglo XIX, la teoría atómica aseguraba que los átomos eran torbellinos de

éter, una sustancia sin peso que se consideraba difundida por todo el espacio.

Ya se ha mencionado en el capítulo I que el inglés Crookes descubrió los rayos catódicos en 1869 y que desde entonces muchos investigadores se dieron a la tarea de hallar las propiedades de esos rayos. En el año de 1895 Jean Perrin, en París, descubrió que los rayos catódicos eran partículas cargadas negativamente y los experimentos que realizó enseguida. J. J. Thomson permitieron determinar su velocidad y medir el cociente de su carga y su masa.

J.J., como le decían cariñosamente sus amigos, realizó sus experimentos con un tubo de descarga al que le habían eliminado el aire del interior, tal como el que se describe en seguida (véase la figura II.1). Los rayos catódicos originados en el electrodo de la izquierda y limitados a un fino haz por los agujeros de los diafragmas D, atraviesan dos placas paralelas de metal y el campo magnético de dos solenoides exteriores hasta llegar a una pantalla fluorescente. Si las placas y los solenoides están descargados, el haz pasa recto y choca en el punto S de la pantalla.

Cuando las placas metálicas están conectadas a una fuente de alto voltaje, el haz de partículas negativas se desvía hacia abajo debido a la carga positiva de la placa inferior (véase la figura II.1) y entonces el haz incide en el punto N, siguiendo una trayectoria parabólica (véase la figura II.2(a)). Por el contrario, cuando se aplica solamente el campo magnético de manera que las líneas magnéticas sean perpendiculares al plano de la página, el haz se curva hacia arriba y llega al punto M. Esto se debe a que en un campo magnético uniforme los electrones siguen una trayectoria circular (véase la figura II.2(b)). J.J. se dio cuenta de que al aplicar el campo magnético y el eléctrico al mismo tiempo las reflexiones podían compensarse y, al cumplirse esa condición, midió el campo eléctrico y la inducción magnética aplicados. El cociente de esos valores resultó ser la velocidad del haz de los rayos catódicos, que es de varios miles de kilómetros por segundo. Este valor depende del voltaje aplicado entre el ánodo y el cátodo.

Thomson se apoyó en esos resultados para continuar sus investigaciones y encontró que el cociente carga/masa (e/m) de los corpúsculos que integraban los rayos catódicos, ahora denominados electrones, era directamente proporcional a la velocidad e inversamente proporcional a la intensidad del campo magnético aplicado y a la distancia r (véase la figura II.2(b)), teniendo en cuenta que sólo se aplique ese campo magnético y el haz se desvíe hacia arriba.

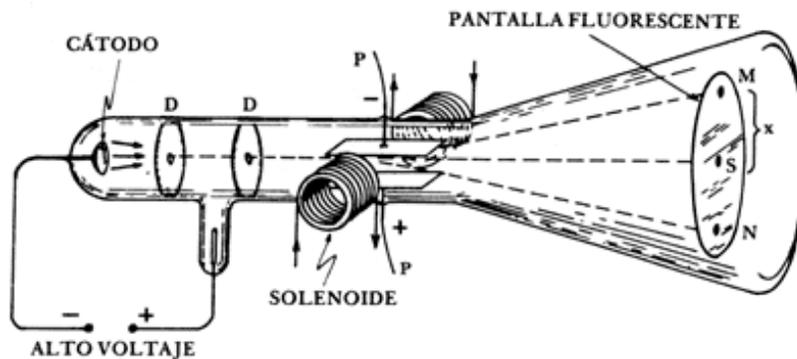


Figura II.1. Diagrama de un tubo de descarga empleado por J.J. para medir la velocidad de los rayos catódicos.

El valor de e/m es de 1.75×10^{18} de culombios por kilogramo! Un valor tan grande significa que la masa de una partícula de rayos catódicos es muy pequeña comparada con la carga en culombios que lleva.

Algunos años después, en 1906, el físico norteamericano Robert Andrews Millikan (1868-1953) encontró el valor de la carga de un electrón. Para escribir esa cifra es necesario colocar 18 ceros a la derecha del punto decimal y luego el número 16, culombios. La masa del electrón pudo calcularse entonces con los resultados de Thomson y Millikan, y para escribir la cifra de su valor se requieren treinta ceros a la derecha del punto decimal y luego el número 9, kilogramo. Estamos hablando de partículas realmente pequeñísimas.

El primer modelo que trató de explicar la constitución del átomo fue el de J. J. Thomson, quien propuso la existencia de una esfera de carga positiva, distribuida en el volumen del átomo, cuyo diámetro es de aproximadamente una diezmillonésima de micra y supuso que partículas con cargas negativas, los electrones, estaban dispersas de alguna forma ordenada en esta esfera.

Thomson fue galardonado con el premio Nobel en 1906 y Millikan en 1923. Cabe aquí señalar que de entre los estudiantes e investigadores de la Universidad de Cambridge varios fueron galardonados con el Nobel además de J. J. Thomson: lord Rayleigh en 1904, Rutherford en 1908, Bragg padre e hijo en 1915, Bohr en 1922, A. H. Compton y C. T. R. Wilson en 1927, P. A. M. Dirac en 1933, J. Chadwick en 1935, G. P. Thomson en 1937, P. M. Blakett en 1948, J. D. Cockcroft y E. T. S. Walton en 1951, y M. Born en 1954.

J.J. Thomson murió el 30 de agosto de 1940 y fue sepultado en la abadía de Westminster, cerca de los restos de Newton, Kelvin, Darwin y Rutherford.

Pero vamos a regresar a la época de fines del siglo XIX y principios del XX en Cambridge, donde tuvieron lugar otros muchos descubrimientos de gran importancia.

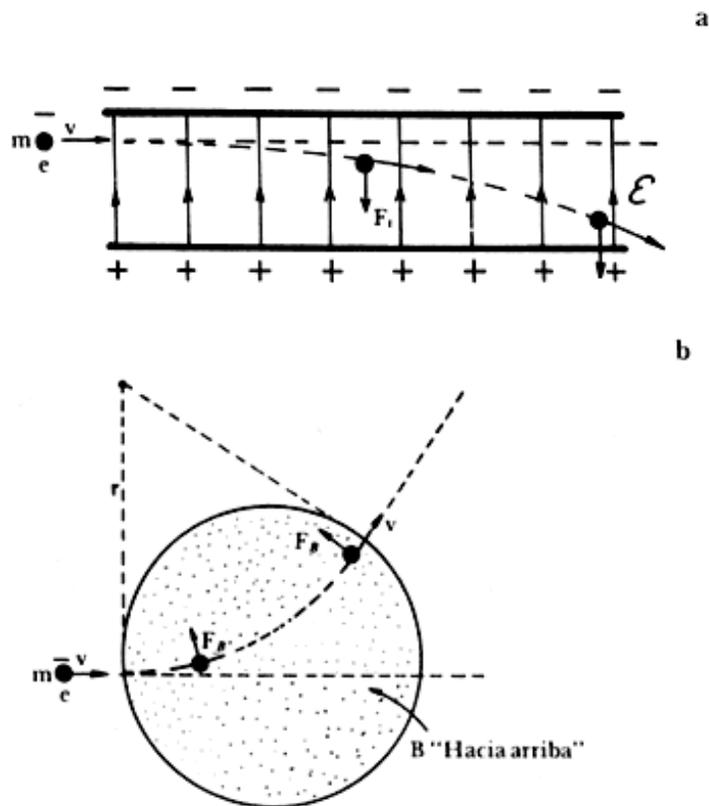


Figura II.2. Comportamiento de los electrones. (a). En un campo eléctrico uniforme describen una trayectoria parabólica. (b). En un campo magnético uniforme, su trayectoria es circular.

ERNEST RUTHERFORD

La soberanía de la Corona británica sobre Nueva Zelanda se inició en 1840. El archipiélago, situado al sureste de Australia, vivía en esa época momentos de gran inestabilidad y quizá por eso el gobierno inglés apoyó el ingreso de sus colonos en aquel país. El escocés George Rutherford y su familia se trasladaron allá en 1842 y se establecieron en la Isla del Sur; que brindaba entonces un desarrollo económico favorable. James, hijo de George creció ya en Nueva Zelanda y casó con Caroline Thompson. La pareja se estableció en un pueblo de Nelson. James era campesino y Caroline maestra de escuela. Ernest, el segundo de sus doce hijos, nació en el 30 de agosto de 1871, y desde pequeño se distinguió por su inteligencia excepcional, lo que impulsó a su familia a sostener sus estudios aun a costa de grandes sacrificios.

Cuando Ernest tenía 15 años ganó una beca al lograr 580 aciertos de un total de 600 preguntas y el premio le permitió asistir al Colegio Nelson, donde fue siempre el primero, no sólo en matemáticas, física y química, si no también en latín, literatura inglesa, francés e historia. En 1889 ganó otra beca para el Colegio Canterbury que en ese tiempo era una institución pequeña con aproximadamente siete profesores y 150 estudiantes.

Rutherford asistió al Colegio Canterbury de 1890 a 1894, se graduó a los 21 años y al siguiente año obtuvo el grado de *Master in Arts, First class honours* en matemáticas y en física; este doble éxito había ocurrido solamente una vez en la historia de la Universidad. Sus profesores fueron: de matemáticas, C. H. Cook y de física, A. Bickerton.

En 1894, Rutherford inició su sorprendente carrera experimental en la Universidad de Canterbury. Fabricó su primer detector magnético a control remoto y pudo mandar y recibir señales a lo largo de su laboratorio. Igual que muchos científicos, fabricaba sus propios aparatos, sencillos pero ingeniosos, pues aseguraba que se invertía más tiempo en el mantenimiento de equipos complicados que en la obtención de resultados. Decía también que siendo una persona sencilla, sus ideas básicas en física serían simples.

Rutherford obtuvo una beca como estudiante universitario distinguido de la Comunidad Británica de Naciones y así logró ser el primer becario de ultramar que se matriculó en la Universidad de Cambridge, Inglaterra, en 1895. Desde entonces fue miembro del Trinity College. Ernest casó en 1900 con Mary Newton, de Christchurch. Al año siguiente, nació su única hija, Eileen.

En el Laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge, Rutherford continuó su trabajo sobre la detección de ondas electromagnéticas de radio. Aumentó gradualmente el límite de la transmisión, y en 1896 pudo mandar señales a media milla de distancia. Nadie había podido mandar señales tan lejos. En ese mismo año publicó un artículo titulado "Un detector magnético de ondas eléctricas." Posteriormente J.J. Thomson lo invitó a unírsele para estudiar el efecto de los rayos X sobre los gases.

La vida profesional de Rutherford puede ubicarse en cuatro periodos: el primero, de 1895 a 1898 en el Laboratorio Cavendish de Cambridge; el segundo, de 1898 a 1907 en la Universidad de McGill en Montreal; el tercero, de 1907 a 1919, en la Universidad de Manchester y el cuarto, de 1919 a 1937, en Cambridge, cuando fue llamado a sustituir a Thomson en el Laboratorio Cavendish como profesor de física experimental. En cada una de estas etapas Rutherford participó decisivamente en el desarrollo del conocimiento: estuvo siempre en el candelero de la ciencia tal como el mismo aseguraba, en el candelero que el había construido. Era un profesor que sabía transmitir a sus discípulos su entusiasmo por la investigación científica. Disfruto de muchas preseas bien merecidas, sean mencionadas el premio Nobel de química en 1908 por sus investigaciones sobre "La desintegración de los elementos y la radiactiva", y el título de barón que le fue otorgado en 1931. Él mismo escogió el título de lord Rutherford de Nelson, por el cariño que le tenía a su tierra natal.

En el número de agosto de 1937 de la revista *Nature*, Rutherford publicó su último artículo que versó sobre el tritio. Utilizando el método de electrólisis trató de enriquecer agua con los átomos pesados del hidrógeno e intentó detectarlos mediante la técnica de la espectrometría de las masas. Ahora sabemos que para haber detectado tritio de esa manera Rutherford tenía que haber enriquecido el agua un millón de veces con tritio, porque se trata de un isótopo muy poco abundante. El tritio se conocía desde 1934, había sido descubierto por M. L. E. Oliphant, P. Harteck y el mismo Rutherford.

Rutherford murió en Londres el 19 de Octubre de 1937. Algunas de sus últimas palabras sirvieron para indicar a su esposa que deseaba heredar 100 libras esterlinas al Colegio Nelson.

LAS RADIACIONES ALFA, BETA Y GAMMA

En 1900 Rutherford estudió las propiedades de un gas emitido por el torio, al que llamó *emanación del torio*; además descubrió que las sustancias radiactivas se estaban desintegrando continuamente. En enero de 1900, en la revista *Philosophical Magazine*, Rutherford publicó una comunicación acerca de una sustancia radiactiva emitida por compuestos de torio. Uno de los experimentos que describía consistía en lo siguiente (véase la figura II.3):

Se pasó una corriente de aire sobre una capa gruesa de óxido de torio encerrado en un recipiente de papel A, dentro de un tubo largo de metal B. A, continuación el aire pasó a un gran recipiente cilíndrico aislado, C, del cual fluyo finalmente, al través de una placa con agujeros finos. El electrodo de metal aislado, D, está conectado a un par de cuadrantes de un electrómetro Kelvin [*un electrómetro es un instrumento electrónico para medir bajas diferencias de potencial y corrientes, extrayendo muy poca corriente del circuito*]. Después de dejar fluir el aire cierto tiempo, se interrumpió su paso y se midió la corriente de ionización entre C y E, durante 10 minutos.

Los resultados se ilustran en la curva A de la figura II.4. Posteriormente Rutherford colocó el óxido de torio en una caja de papel, entre dos cilindros de metal aislados y concéntricos, a lo largo de los cuales pasó una corriente de aire a fin de separar la emanación a medida que se formara (figura II.3). Al cesar el flujo de aire y medir la corriente de ionización entre los dos cilindros se obtuvieron los resultados representados en la curva B de la figura II.4. se puede observar que la suma de A + B en la figura II.4 es constante en todo tiempo, t. Esto indica que, en equilibrio, la emanación se produce con la misma rapidez con que desaparece.

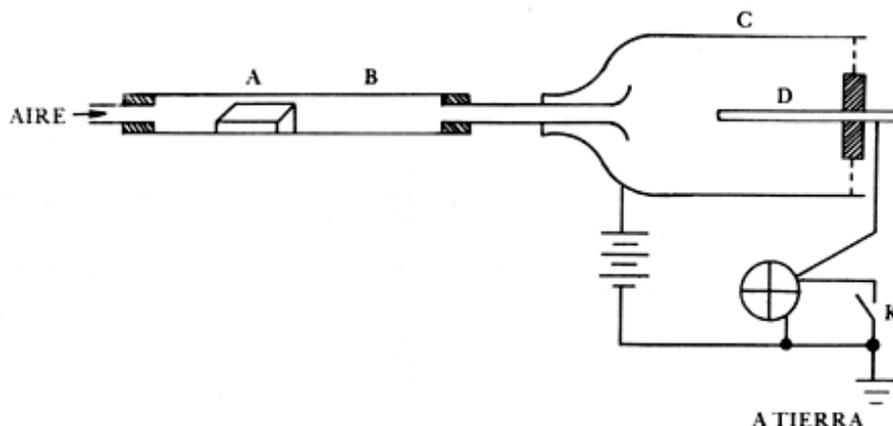


Figura II.3. aparato de Rutherford para demostrar la desintegración de la emanación torón. A: óxido de torio. B: tubo metálico. C: recipiente para captar el torón. D: electrodo metálico. K: electrometro Kelvin.

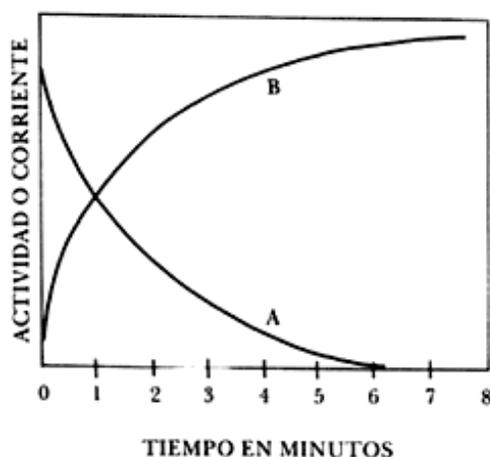


Figura II.4. Curvas de desintegración (A) y crecimiento (B) del torón.

Ernest Rutherford y Frederick Soddy (1877-1956), este último merecedor del Nobel de química en 1921, establecieron las relaciones mutuas de muchos elementos radiactivos naturales y también que la ley de disminución de la radiactividad es exponencial, es decir, que durante un intervalo de tiempo la variación promedio de radiactividad es proporcional a la actividad inicial (véase la gráfica de la vida media en la figura I.3 del capítulo I).

Aunque a Becquerel y a los esposos Curie se debe el mérito del descubrimiento de la radiactividad y de los elementos polonio y radio, en las cuatro décadas siguientes este campo estuvo dominado por Rutherford y sus colaboradores. Hacia 1904 se habían descubierto unos 20 elementos radiactivos, gracias a una serie de investigaciones brillantes e ingeniosas de Rutherford, a menudo en colaboración con Soddy. También fue una accidente feliz, en este aspecto, que P. Curie descubriera una emanación del torio, y que estos investigadores pudieran llegar a la conclusión de que tales emanaciones eran gases nobles, a saber, radón y torón, este último identificado posteriormente como un isótopo del radón.

Rutherford y Soddy publicaron algunos artículos sobre la causa y la naturaleza de la radiactividad y el cambio radiactivo. En el número de noviembre de 1902 de la revista *Philosophical Magazine* dijeron:

La interpretación de los experimentos arriba mencionados tiene que ser, por consiguiente, que la emanación es un gas químicamente inerte, de naturaleza análoga a los miembros de la familia del argón. En la misma comunicación

hacen especulaciones acerca de la asociación del helio con la radiactividad, y en su conclusión dicen que la ley de la declinación con el tiempo aparece como la expresión de la ley simple del cambio químico, en la cual una sustancia solo se altera a velocidad proporcional a la cantidad de ella.

Rutherford encontró que el uranio emitía dos tipos de radiación diferentes por su poder de penetración. Estos eran los rayos alfa, que podían ser detenidos fácilmente por una hoja papel o en una trayectoria por el aire de unos cuantos centímetros y los rayos beta, que eran mucho más penetrantes y podían atravesar una capa de varios milímetros de aluminio. Ahora se sabe que el uranio mismo no emite radiación beta, sino la radiación alfa y que la radiación beta observada entonces provenía de algunos hijos radiactivos. En 1900; el francés Paul Ulrich Villard (1860-1934) halló que el radio emitía un tercer tipo de radiación mucho más penetrante, y los rayos de este tipo fueron llamados rayos gamma.

La identidad de los rayos alfa y gama eludió ser determinada durante varios años. Inicialmente se creyó que un campo electromagnético no ejercía influencia sobre los rayos alfa, pero en 1902 Rutherford mostró que estos rayos sí eran desviados por campos eléctricos y magnéticos poderosos, y que para un campo dado su desviación era mucho menor que la de los rayos beta y en dirección opuesta, lo que indicaba que esos rayos eran partículas cargadas positivamente. También en 1902, por la medición de la desviación de los rayos alfa del radio en campos eléctricos y magnéticos, Rutherford llegó a la conclusión de que esos rayos viajaba a la velocidad de 2 500 000 000 cm/seg y que su razón carga/masa era aproximadamente de 6 000 unidades atómicas de masa por gramo.

Quedó entonces establecido que las partículas alfa son idénticas al núcleo del elemento helio, que las beta son similares a los electrones extranucleares y que la radiación gamma la constituyen ondas electromagnéticas de la misma frecuencia o ligeramente mayor que la de los rayos X. Es importante, sin embargo, hacer notar aquí que tanto las radiaciones alfa como las beta y las gamma provienen de los núcleos atómicos.

En nuestro tiempo se conoce ya la naturaleza de los esquemas de desintegración gracias al esfuerzo notable de todos aquellos investigadores. Ahora, con los modernos detectores de radiactividad y los equipos electrónicos disponibles, entre ellos las computadoras, es muy fácil reproducir sus resultados.

En 1903 Rutherford calculó la enorme cantidad de energía que se libera en el decaimiento del radio. Mostró que la energía que interviene en la transformación de los átomos es mucho mayor que la que lo hace en la reacción química de los mismos átomos. En ese mismo año fue electo presidente de la Royal Society, el mismo puesto que ocupó Newton de 1703 a 1727.

EL DETECTOR GEIGER

En 1908, Rutherford y el físico alemán Geiger (1882-1945) encontraron un método para detectar las partículas subatómicas individuales y construyeron el primer contador de partículas, más tarde mejorado por Geiger. Este fue el famoso contador Geiger que aún se emplea.

Rutherford y Geiger detectaron y contaron las partículas por medio de su acción ionizante. Aunque este efecto era demasiado pequeño para medirlo directamente con los medios de que se disponía, era posible multiplicar el número de iones formado por cada partícula mediante la ionización por colisión. El dispositivo está representado en la figura II.5. La presión en el interior del tubo es de unos cuantos centímetros de mercurio. Si la partícula alfa atraviesa la ventana V se produce una pulsación de corriente y el electrómetro E indica una desviación, que desaparece rápidamente, porque la carga eléctrica se disipa a través de la resistencia R. La duración de la descarga es de aproximadamente 10^{-4} s, pero la inercia del electrómetro de cuadrantes impedía poder contar más de tres a cinco partículas por minuto. Actualmente este método es uno de los más rápidos y con él se puede contar un millón de partículas por segundo.

En 1913 Geiger describió el contador puntiforme (figura II.6). El extremo de un alambre delgado termina en una punta fina P, en el interior del tubo hay, aire seco a la presión atmosférica, y las partículas penetran al través de V. Geiger aplicó al tubo un voltaje de 1 000 a 2 000 volts y observó que si una partícula pasa al través de V se produce una descarga momentánea desde la punta, y el electrómetro registra una pulsación. El motivo de la inmediata interrupción de la descarga es el efecto de la carga espacial.

El contador Geiger-Müller fue ideado en 1928 (figura II.7). Está formado por un alambre delgado montado en el

eje de un cilindro que contiene un gas a presión de 2 a 10 mm de mercurio. El funcionamiento de este tubo es análogo al del anterior, pero en lugar de una descarga puntiforme se obtiene una descarga de corona.

El funcionamiento de estos detectores de radiación se basa en que cuando un gas se encuentra encerrado en un recipiente y se le aplica una diferencia de potencial, se pueden recolectar en los electrodos correspondientes los electrones y los iones producidos por la radiación que lo atraviesa. Ambos electrodos deben estar separados por un material aislante y conectados a una fuente de voltaje que crea una diferencia de potencial.

En la figura II.8 puede observarse que las curvas que forman la gráfica del número de iones recolectados como una función del voltaje aplicado en los electrodos, dependen de la naturaleza de la radiación incidente: así, la curva de las partículas alfa se sitúa por encima de la que se obtiene con las beta. Esto se debe a que las partículas alfa son más ionizantes que las beta y provocan un mayor número de iones por unidad de longitud en su recorrido.

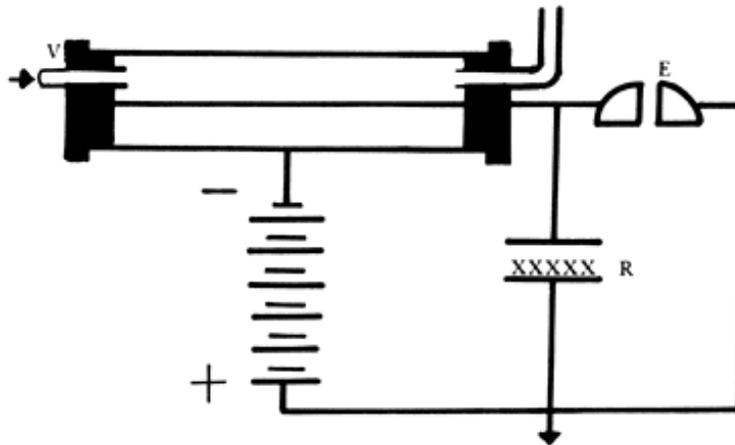


Figura II.5. Contador proporcional. V: ventana. E: electrómetro. R: resistencia.

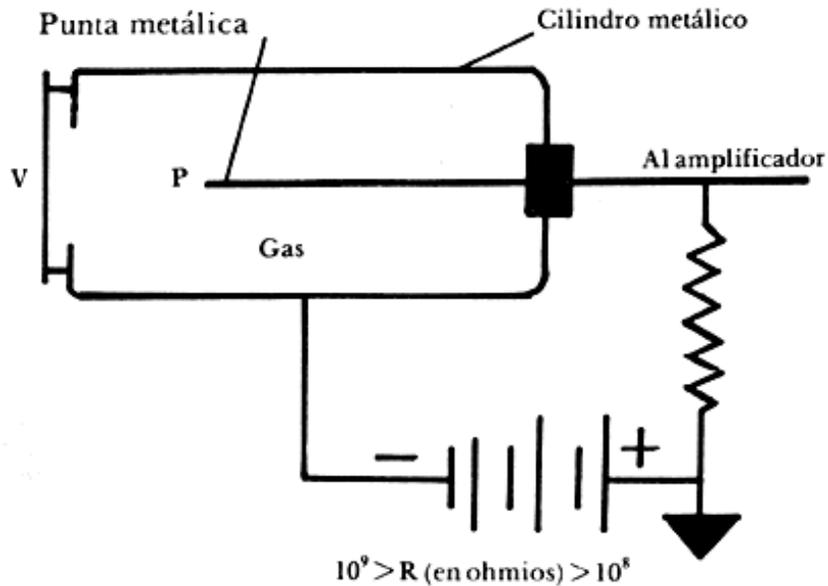


Figura II.6. contador puntiforme. V: ventana.

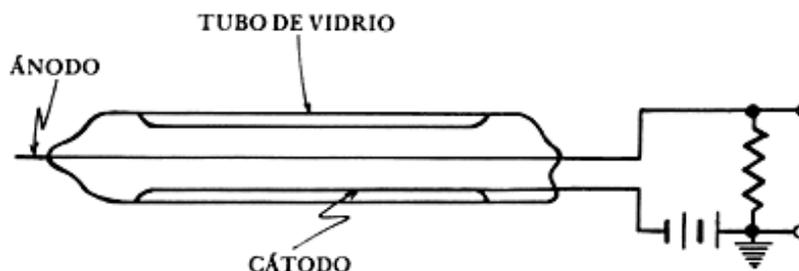


Figura II.7. Contador Geiger-Müller.

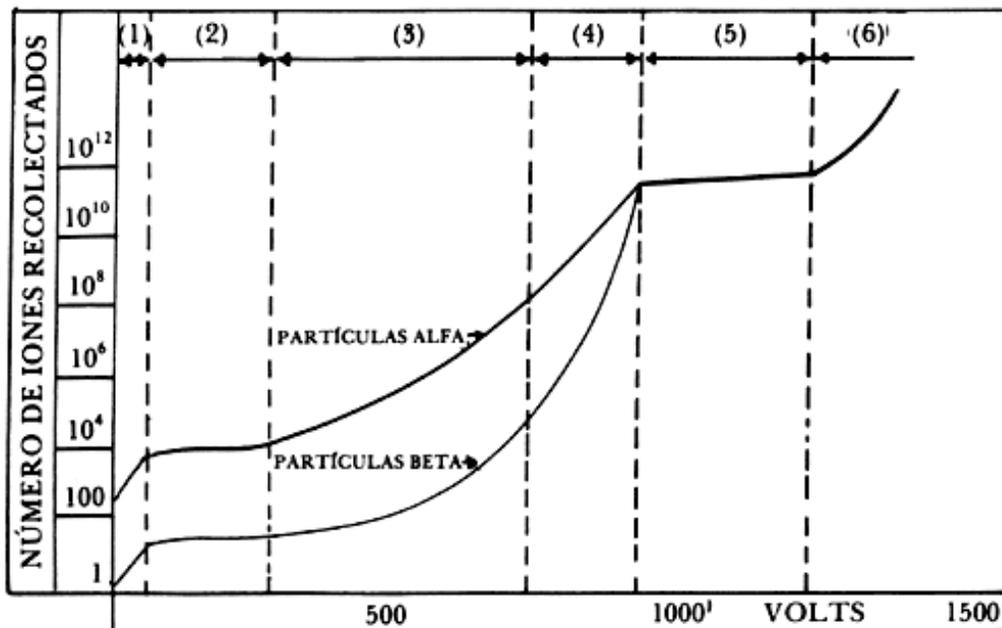


Figura II.8. Variación del número de iones colectados en función del voltaje aplicado a un sistema de electrodos (1). Recombinación (2). Cámara de ionización (3). Contador proporcional (4). Región de proporcionalidad limitada (5). Geiger (6). Región de descarga continua.

El número de iones recolectados no es proporcional al voltaje aplicado, debido a que los iones creados por la radiación se comportan de manera diferente al aumentar el voltaje; esto origina la existencia de varias regiones en las curvas.

Cuando el voltaje que se aplica es muy bajo, la atracción que ejercen los electrodos sobre los iones formados es pequeña, por lo que una fracción de esos pares de iones tiende a recombinarse entre sí, sin permitir que se lleguen a recolectar. A medida que el voltaje aumenta, la fuerza de atracción crece hasta que se recolectan todos los iones formados en el detector. Esto es lo que sucede en la región conocida como de saturación, representada con el número 2 de la figura II.8. El dispositivo utilizado se denomina cámara de ionización, de allí que la región de saturación se denomine también región de la cámara de ionización. En esa región de voltaje se recolectan los llamados iones primarios, formados directamente por la interacción de la radiación con el gas.

Cuando el voltaje aumenta, esos iones primarios se aceleran de tal manera que pueden a su vez provocar ionizaciones. Los nuevos iones formados se denominan iones secundarios y al efecto se le denomina amplificación por el gas. En la región 3 de la figura II.8, el número de iones recolectados crece proporcionalmente según el voltaje aplicado, por lo que al detector que utiliza esa región de voltaje se le conoce como detector proporcional. En la misma región puede observarse que la inclinación de la curva para las partículas alfa es idéntica a las de las beta.

Parecería que el efecto de amplificación continuaría indefinidamente al aumentar el voltaje; sin embargo, se llega a un valor de voltaje tal que la atracción ejercida por los electrodos en los iones y electrones es tan fuerte que éstos son rápidamente absorbidos por el electrodo central, mientras que los iones positivos que se desplazan a velocidades menores permanecen aún en el detector y dan la impresión de que engrosan el diámetro del electrodo central. Con esto disminuye la intensidad de la fuerza de atracción y cambia la proporcionalidad entre el número de iones recolectados y el voltaje.

Cuando el voltaje se incrementa más todavía, el número de iones recolectados es independiente del tipo de radiación y del número de iones primarios formados, porque la atracción que crea el voltaje hace que los electrones se aceleren y por cada ionización se crean más iones secundarios, formándose así una reacción en cadena. Esta región, la número 5 de la figura II.8, la estudió Geiger con el tubo detector que lleva su nombre. Con voltajes todavía más altos, el tubo comienza a producir un gran número de señales, aun cuando ninguna radiación lo atraviese, hasta llegar a hacerlo de manera continua; a esto se le llama "región de descarga continua del tubo" (región número 6 de la figura II.8) y parece como si el detector estuviera contando las partículas cargadas.

En la práctica, un mismo tubo no puede utilizarse con cualquier voltaje, porque para cada región existen condiciones específicas. Desde el punto de vista del alambre central, los detectores Geiger y proporcional utilizan alambres más delgados que la cámara de ionización, para lograr voltajes más altos. En lo referente al gas de llenado, las cámaras de ionización pueden llenarse con aire, los contadores proporcionales, con metano, bióxido de carbono o una mezcla de argón y metano, y los Geiger, con una mezcla de gases tales como el argón o el neón y un compuesto orgánico (etanol) o un gas halógeno (cloro o bromo).

EL MODELO NUCLEAR DE RUTHERFORD

De 1909 a 1911 Rutherford, Geiger y Marsden hicieron experimentos sobre la dispersión de las partículas alfa en la materia. Esos experimentos proporcionaron información sobre la radiactividad natural de los elementos y se comprobó que el elemento radio emitía partículas en forma espontánea.

El aparato con el cual realizaron sus experimentos estaba integrado por una cámara al vacío que contenía en su interior un fuente del elemento radio, el cual emitía partículas alfa en todas direcciones. Dentro de la cámara se encontraba un bloque de plomo con un orificio central para colmar al haz de partículas alfa. El haz llegaba hasta una lámina de oro de media micra de espesor y al final de la cámara colocaron una pantalla de sulfuro de cinc (véase la figura II.9).

Rutherford y sus colaboradores observaron que la mayoría de las partículas atravesaban la delgada lámina de oro y producían centellas en la pantalla de sulfuro de cinc; pero también que algunas eran desviadas y otras, muy pocas, eran repelidas totalmente por la lámina de oro.

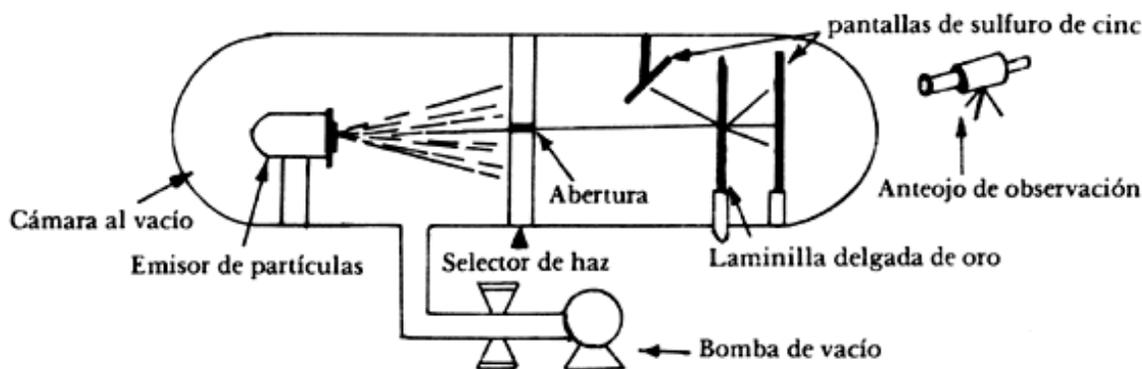


Figura II.9. Aparato usado por Rutherford y sus colaboradores para estudiar la estructura del átomo.

Las observaciones anteriores y las consideraciones de que el oro no puede ser comprimido (lo cual hace suponer que sus átomos están acomodados regularmente) y de que las partículas alfa son cuatro veces más pesadas que el hidrógeno y manifiestan una carga de $2+$, condujeron a Rutherford a las siguientes conclusiones:

- a) El núcleo es una parte pequeña central del átomo de oro y tiene carga positiva.
- b) El núcleo es tan pequeño que es muy poco frecuente que una partícula alfa choque con él o pase cerca y sea desviada.
- c) El núcleo tiene una masa mayor que las partículas alfa y es de carga positiva porque cuando una partícula alfa choca con él, ésta es repelida y entonces rebota.
- d) El átomo está casi vacío y los electrones están muy alejados del núcleo, ya que la mayoría de las partículas alfa atraviesan la lámina de oro y son pocas las que rebotan o se desvían.
- e) Los electrones son 1 836 veces menos pesados que el protón y las partículas alfa son núcleos de helio cuya masa es cuatro unidades mayor que la del protón, por lo tanto las partículas alfa no son desviadas por los electrones.

f) La masa del átomo es la suma de sus constituyentes nucleares, ya que casi la totalidad de la masa de los átomos se encuentra en el núcleo.

Rutherford calculó que el tamaño del núcleo es aproximadamente 10^{-13} a 10^{-15} cm, por lo que es un millón de veces más pequeño que el átomo y la distancia que separa un núcleo de otro es del orden de 10^{-8} cm. Ésa es la razón por la que la mayoría de las partículas alfa podían atravesar la lámina de oro. Rutherford preparó una imagen nueva de la estructura del átomo. Sus cálculos matemáticos basados en esos experimentos revelaron al mundo científico una idea del tamaño del núcleo central y del espacio a su alrededor. En 1911, Rutherford propuso su modelo nuclear del átomo, que fue publicado en el *Philosophical Magazine*. Posteriormente Moseley y Bohr completaron las observaciones y trabajos de Rutherford y establecieron otros modelos tendientes a explicar la estructura del átomo.

EL NEUTRÓN

En junio de 1920 Rutherford, en una conferencia ante la Royal Society, hizo una de sus más importantes predicciones: dijo que podría existir, en alguna parte del átomo, una partícula neutra, la cual, si se encontrara, sería mucho más útil como proyectil que las partículas alfa.

En 1930, W. Bothe y H. Becker observaron que algunos de los elementos más ligeros, como el litio y el berilio, emitían una radiación muy penetrante cuando eran bombardeados con partículas alfa procedentes de los elementos radiactivos naturales.

La publicación del 18 de enero de 1932 de Irène Curie y Frederic Joliot, en las *Actas de la Academia de Ciencias* (véase el capítulo III), interesó profundamente a James Chadwick, quien en 1919 había ingresado al Laboratorio Cavendish de Cambridge, donde Rutherford era el director. Rutherford, interesado en el tema al igual que Chadwick, pidió a éste que verificara las medidas de los Joliot, lo que realizó de inmediato gracias a las fuentes intensas de polonio que el mismo Chadwick acababa de preparar. La idea de la existencia de una partícula neutra, de masa igual a la del protón, flotaba en el ambiente del Laboratorio Cavendish desde que Rutherford había sugerido que una partícula así podía existir.

Después de algunos días de intenso trabajo Chadwick, al estudiar las características de las colisiones de la radiación desconocida con los protones y con otros núcleos ligeros, comprobó que se trataba de neutrones. Esto fue posible gracias a su sistema de detección, que consistía en una cámara de ionización conectada a un amplificador proporcional de válvulas, con el cual podía medir la energía de las radiaciones observadas. Este descubrimiento permitió a James Chadwick recibir el premio Nobel de física en 1935. El equipo utilizado en estos experimentos, muy moderno en esos días, no existía en el Instituto del Radio en Francia, razón por la cual los Joliot no se dieron cuenta de la existencia del neutrón. Sin embargo, puede decirse que el hallazgo del neutrón se dio como el fruto de las investigaciones llevadas a cabo sucesivamente en tres países diferentes: Alemania, Francia y Gran Bretaña y gracias a la comunicación existente entre los científicos de esa época. El descubrimiento del neutrón fue el inicio de la era nuclear.

OTRAS INVESTIGACIONES

Posteriormente, el interés se enfocó hacia la posibilidad de producir partículas rápidas para bombardear núcleos y esto dio como resultado la fabricación de los aceleradores de partículas. Entre los primeros se puede mencionar la máquina de Bothe y Becquer en Alemania, la de Cockcroft-Walton en el Laboratorio Cavendish de Cambridge, y el ciclotrón del norteamericano Lawrence.

Los experimentos realizados con esas máquinas fueron decisivos para la física nuclear. Aunque al principio la energía de los haces de protones obtenidos fue solamente de 400 000 a 500 000 volts, se pudo comprobar, por ejemplo, que los protones penetran en los átomos de litio, cuyo peso atómico es 7, para formar una sustancia de peso atómico 8, la cual se desintegra rápidamente en 2 átomos de helio, cada uno de peso atómico 4.

Los reunidos acerca de los estados fundamentales de los diferentes núcleos y de sus estados excitados, obtenido

tanto mediante el estudio de los isótopos radiactivos como por las investigaciones acerca de las reacciones nucleares, han servido para la elaboración de los modelos nucleares. Estos generalmente tratan de explicar el máximo número de hechos con el mínimo de hipótesis acerca de la estructura nuclear y la interacción entre nucleones en el núcleo.

Prosigue en la actualidad el estudio de la estructura nuclear, gracias a los aceleradores de partículas de cada vez mayor rendimiento construidos en los últimos años, con el propósito de comprender mejor la interacción entre nucleones en el interior del núcleo y los fenómenos que suceden en la materia nuclear excitada por colisiones con iones pesados de diferentes energías. En fin, la estructura íntima del átomo sigue siendo un campo fértil para el estudio y un reto difícil de vencer.

BIBLIOGRAFÍA

M. Jiménez Reyes, "La medición de la radiación nuclear", *Ciencia y Desarrollo*, núm. 23, 67, 1978.

J. Paredes y L. A. Huerta, *El núcleo y su desarrollo* 1a. ed., Editorial Edicol, México, 1975.

Accolade Books, *Enciclopedia Biográfica Universal*, volumen III, Promociones Editoriales Mexicanas, México, 1982.

W. B. Mann y S. B. Garfinkel, *Radiactividad y su medida*, 1a. ed. en español, Editorial Reverté Mexicana, 1968.

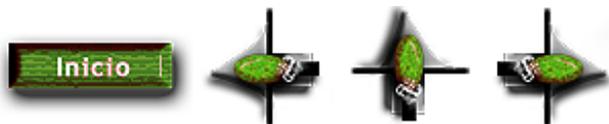
P. Radványi y M. Bordry, *La radiactividad artificial*, Salvat Editores, España, 1987.

M. Villaronga Maicas, *Atlas del átomo*, 4a. ed., Ediciones Jover, Barcelona. 1974.

H. E. White, *Introducción a la física atómica y nuclear*, 1a. ed., Editorial Alhambra, España, 1970.

Diccionario de física, Colección Llave de la Ciencia, director, J. Daintith, Edinorma, Bogotá, 1984.

J. E. Greene, *100 grandes científicos*, 10a. ed., Editorial Diana, México, 1981.



III. LA RADIOACTIVIDAD ARTIFICIAL

SUILMA M. FERNÁNDEZ-VALVERDE

SILVIA BULBULIAN

LOS DESCUBRIDORES: FRÉDÉRIC E IRÈNE JOLIOT CURIE.

JEAN FRÉDÉRIC, hijo menor de la familia Joliot, nació en París, Francia, el 19 de marzo de 1900. Era un niño bullicioso e impulsivo. Fue su padre un industrial francés, quien le transmitió el gusto por la caza, la pesca y las actividades al aire libre; su madre, enérgica y culta, le legó sus ideas republicanas. Era un alumno como muchos en la escuela secundaria, sobresaliente en gimnasia. No fue sino hasta el bachillerato cuando se interesó en la física y la química y construyó un pequeño laboratorio en el baño de su casa, el cual adornó con fotografías, entre las que destacaba la de los esposos Curie, pues Frédéric admiraba enormemente a Pierre Curie.

Ya en la universidad, en la Escuela de Física y Química, fue alumno de Paul Langevin, quien influyó notablemente en Frédéric, tanto en el dominio de la ciencia como en el de la política. Langevin apreciaba la mente lúcida de Frédéric y admiraba la claridad de su razonamiento. Siendo todavía estudiante, Frédéric se interesó por el desarrollo tecnológico. Egresó de la escuela en 1922 con el título de ingeniero. Sólo pudo trabajar seis semanas en la industria antes de incorporarse al servicio militar; no fue sino hasta que se reintegró a la vida civil cuando se reveló su verdadera vocación: la ciencia.

Tuvo la oportunidad de entrar en contacto con Langevin y de hacerlo partícipe de sus inquietudes científicas. Langevin le ofreció entonces una de las becas Rothschild. Aun cuando la beca implicaba una retribución económica menor a la que podía recibir en la industria, Frédéric la aceptó de inmediato. Poco después Langevin le comunicó que sería técnico de Marie Curie en el Instituto del Radio. Trabajar con ella fue, para Frédéric, la realización inesperada de su más grande anhelo.

Irène era la primogénita de Pierre y Marie Curie. Nació en París, Francia, en 1897. A la edad de 17 años ya ayudaba a su madre en los servicios radiológicos de los hospitales durante la primera Guerra Mundial, tarea muy dura, ya que desde temprana edad tuvo que enfrentarse a los horrores de la guerra. El hecho de trabajar con los rayos X sin la protección adecuada le originó, sin duda, los males que le aquejaron más tarde. Estas actividades le dieron la oportunidad a Marie Curie de observar el talento de su hija mayor. Después de la Guerra, Irène empezó a trabajar en 1919, en el Instituto del Radio con su madre; así nació la colaboración más estrecha que en el plano científico se haya dado en ese Instituto. Irène ideó un electroscopio de hojas de oro para medir la radiactividad (figura III.1). Más tarde se dedicó a la investigación básica y preparó su tesis sobre los rayos del polonio, tesis que sustentó en 1925.

Desde los veinte años, Irène Curie ya tenía la personalidad que la iba a caracterizar siempre. Serena y pensativa, contrastaba fuertemente al lado de Frédéric, elegante y simpático; no obstante, tenían en común sus ideas avanzadas y el gusto por los deportes al aire libre, la natación, los barcos de vela y esquiar.

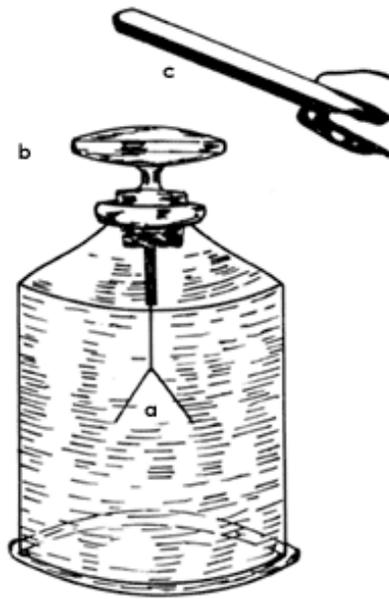


Figura III.1. Electroscopio de hojas de oro. Las hojas divergen por repulsión eléctrica, debido a la carga de la barra; en caso de que las descargas sean iguales, y se atraen cuando las cargas son diferentes.

El matrimonio de Jean Frédéric e Irène, el 4 de octubre de 1926, asombró profundamente a sus amigos y conocidos. Transcurrió mucho tiempo antes de que se apagaran los rumores generados por esta boda: Diez años después Frédéric comentaba con amargura que no lo habían entendido y que su matrimonio con Irène no se debía al interés por su profesión. Frédéric había sentido además el rechazo de los científicos de París, por provenir de la Politécnica y esto no lo olvidó jamás.

En esta época, después de pasar sus exámenes de doctorado, Frédéric solicitó una plaza de tiempo completo en la universidad; la cual le fue negada. En 1930 el matrimonio tenía ya una hija, Helène. Posteriormente, en 1932 nacería Pierre y por lo tanto la beca Rothschild de que disponía Frédéric era insuficiente para sus necesidades económicas. Como sus oportunidades en el Instituto del Radio estaban bloqueadas a pesar de ser yerno de Marie Curie, Frédéric pensó seriamente en abandonar la ciencia. Fue entonces cuando inició sus clases de medidas eléctricas en la Escuela de Electricidad Industrial Charliat, pudiendo así continuar su trabajo científico. Marie Curie opinaba que su yerno era un hombre muy brillante, decía que "producía destellos".

Hasta el año de 1927 Irène y Frédéric habían trabajado en forma independiente y habían publicado una gran cantidad de estudios pero, ninguno de los dos se había afirmado cómo investigador.

INVESTIGACIONES EN EL INSTITUTO DEL RADIO

Los nuevos elementos, el polonio y el radio, habían despertado debido principalmente a una de sus principales características: emitir radiación ionizante. Marie Curie llamó *radiactividad* a esta propiedad de la materia.

El primer experimento en el que se mostró la transmutación de la materia fue en el año de 1919 en Inglaterra, por Rutherford, con partículas alfa provenientes de la desintegración radiactiva del polonio (véase el capítulo sobre la estructura del átomo). Rutherford bombardeó núcleos de nitrógeno con partículas alfa y encontró que, en esta reacción los núcleos de nitrógeno se transforman en núcleos de oxígeno. Rutherford mostró así que un elemento químico puede transformarse artificialmente en otro con propiedades físicas y químicas diferentes a las del original, lo cual sólo se había observado anteriormente en los elementos radiactivos naturales.

Irène y Frédéric utilizaron el radio separado por Marie (1.5 g de radio al cual se había acumulado polonio en el transcurso de los años). Su primer trabajo en colaboración consistió en la preparación de una muestra de polonio de gran pureza y de actividad específica elevada utilizando la técnica de electrólisis. [*Se llama electrólisis a la producción de un cambio químico que se realiza haciendo pasar una carga eléctrica por ciertos líquidos conductores (electrolitos). La corriente se conduce por migración de iones. Los positivos, cationes, van al cátodo (electrodo negativo) y los negativos, aniones al ánodo (electrodo positivo).*] Lograron obtener fuentes de 200

milicurios sobre superficies de 20 milímetros cuadrados y resumieron sus resultados en una nota a la Academia de Ciencias de Francia sobre el número de iones producidos por los rayos alfa del polonio.

A fines de 1930 los experimentos más comunes en física nuclear en Europa consistían en tomar dos sustancias, una radiactiva y otra inerte, ponerlas en contacto y estudiar los resultados. En principio, se podía deducir lo que pasaba cuando una partícula chocaba con un átomo de la sustancia bombardeada, pero en la práctica normalmente no era posible identificar a los productos de la reacción. Dos investigadores alemanes, Walter Bothe y Herbert Becker, bombardearon un fragmento de berilio con partículas alfa provenientes de una fuente de radio y comprobaron que se producía una radiación muy penetrante, capaz de atravesar 2 cm de plomo.

Muchos investigadores, entre ellos Frédéric e Irène, pensaron que se trataba de una nueva clase de radiación gamma. Con el propósito de esclarecer este problema, los esposos empezaron a trabajar, a principios de 1932, con la fuente de polonio que habían preparado, la cual tenía la ventaja sobre el muy utilizado radio, de emitir casi únicamente radiación alfa (figura III.2).

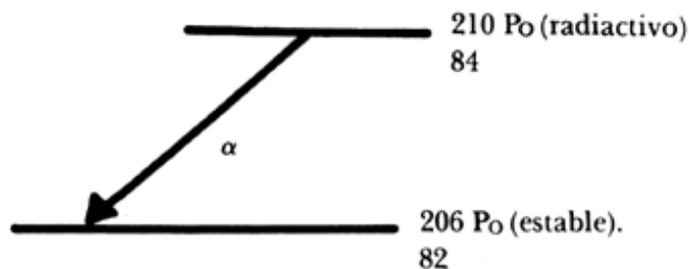


Figura III.2. Esquema del decaimiento del polonio 210.

EL NEUTRÓN

Los esposos Joliot observaron intrigados que cuando se exponía el boro o el berilio a la radiación alfa de su fuente de polonio detectaban las misteriosas radiaciones (o partículas) penetrantes. Más adelante decidieron colocar frente a estas radiaciones diversos elementos, en particular el más ligero de todos, el hidrógeno de la parafina, del celofán o del agua. Observaron con asombro que, por efecto de las radiaciones desconocidas, los átomos de hidrógeno salían despedidos a gran velocidad. Este trabajo se publicó el 18 de enero de 1932, en las *Actas de la Academia de Ciencias de Francia*. El fenómeno que se describe se encuentra representado en la figura III.3 para el caso particular de una molécula de propano.

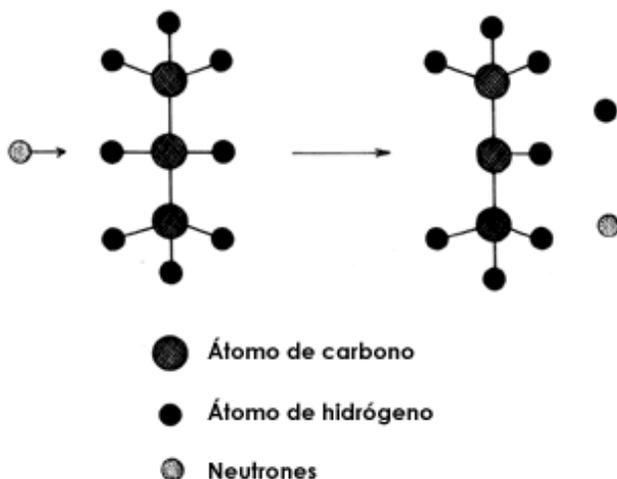


Figura III.3. Proyección de los átomos de hidrógeno, en una molécula de propano, por los neutrones producidos en la reacción nuclear.

James Chadwick (189-1974), del Laboratorio Cavendish de Cambridge, al leer el trabajo publicado por los científicos franceses intuyó de inmediato que esta nueva radiación comprendía no sólo radiación gamma sino una partícula aún no descubierta, el neutrón, que había sido propuesta teóricamente por su maestro Rutherford, pero en diez años no se había logrado probar su existencia. Aun cuando la participación de los esposos Joliot fue

fundamental en el descubrimiento del neutrón, su desilusión fue muy grande al enterarse de cuán cerca habían estado de identificarlo. En efecto, el equipo de detección con que contaban en el Instituto del Radio no les hubiera permitido nunca llegar a ese hallazgo. Chadwick, en cambio, contaba con un detector asociado a un amplificador que le permitía seguir las partículas emitidas, y pudo así probar experimentalmente que la nueva radiación estaba constituida, de hecho, tanto por rayos gamma como por neutrones.

Frédéric e Irène Joliot habían estado muy cerca de descubrir el neutrón. Sin embargo, fue Chadwick quien pudo explicar el fenómeno observado por los esposos franceses y fue él también quien recibió el premio Nobel por el descubrimiento del neutrón. Se cuenta que Rutherford (1871-1937) habría comentado "Sería mejor esperar un año antes de dar el premio a Chadwick. Me extrañaría mucho que los dos jóvenes franceses no hicieran ningún descubrimiento de aquí a entonces."

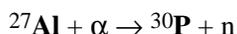
ELECTRONES POSITIVOS

En 1928 el físico Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984), en Cambridge, formuló su teoría cuántica relativista del electrón que tenía en cuenta su movimiento de rotación sobre sí mismo, como si fuera un trompo. Esta rotación se conoce con el nombre de spin. Esta teoría conducía a una ecuación con dos soluciones: una parte negativa y una parte positiva. La primera solución correspondía al electrón y Dirac pensó que la segunda correspondía al protón. No fue sino hasta 1931 que por una crítica de J. Robert Oppenheimer (1904-1967) se propuso la existencia del antielectrón o positrón.

Ese mismo año Frédéric desarrolló un nuevo modelo de cámara de Wilson de presión variable que podía situarse en un campo magnético. *[La cámara de Wilson o cámara de niebla es una cámara con vapor de agua, en la cual, al aumentar el volumen de la cámara, se provoca una disminución de la temperatura y la condensación del vapor en forma de gotitas de niebla. En condiciones adecuadas la condensación de las gotitas se efectúa sobre los iones producidos por una radiación (el paso de una partícula α , un electrón o un protón, ioniza el gas que atraviesa, es decir, crea a lo largo de su recorrido un cierto número de pares de iones), las gotitas se forman sobre estos iones, y así se obtiene la trayectoria de las partículas cargadas visibles a simple vista, las cuales se pueden fotografiar. En la primavera de 1911, Wilson observó las trayectorias de los electrones creados al atravesar los rayos X su cámara.]*

El 2 de agosto de 1932, Carl David Anderson (1905 -) en una cámara de Wilson vertical construida por él y R. A. Millikan, observó una trayectoria de carga positiva, la cual no correspondía a ninguna de las partículas conocidas hasta entonces. No podía tratarse de un protón a causa de la longitud de la huella y por el hecho de que había atravesado seis milímetros de plomo (véase el capítulo I sobre las propiedades de las partículas). Por sus observaciones experimentales dedujo que tenía una masa comparable a la del electrón y le dio el nombre de electrón positivo o positrón, lo que le valió, en 1936, el premio Nobel. La existencia del positrón demostró corresponder a la segunda solución a la ecuación de Dirac mencionada anteriormente.

En tanto, Frédéric realizaba nuevas pruebas sobre la emisión de neutrones. Frédéric e Irène se preguntaban sobre la reacción implicada en el caso del aluminio, estudiada por Bothe y Becker. Entre diferentes hipótesis, especularon con la posibilidad de una reacción.



El ${}^{30}\text{P}$ sería un isótopo aún desconocido del fósforo, hipótesis que les planteaba dificultades, ya que para ellos, como para todos los físicos de la época, el núcleo final resultante sólo podía ser un núcleo estable:

A partir de las observaciones que hicieron en la cámara de Wilson, Frédéric e Irène habían señalado "ciertas trayectorias desviadas en sentido contrario por el campo magnético", que ellos explicaron como cierto número de electrones de energía cuántica elevada que se dirigía hacia la fuente. Después del descubrimiento del positrón por Anderson, esta observación quedaba explicada: se trataba de los electrones positivos que debían ser producidos por la radiación γ .

Frédéric e Irène Joliot establecieron que los rayos γ energéticos de los elementos naturales se materializaban, es decir, producían un par e^+e^- (positrón-electrón). Confirmaron que esta materialización sólo aparece en el caso de

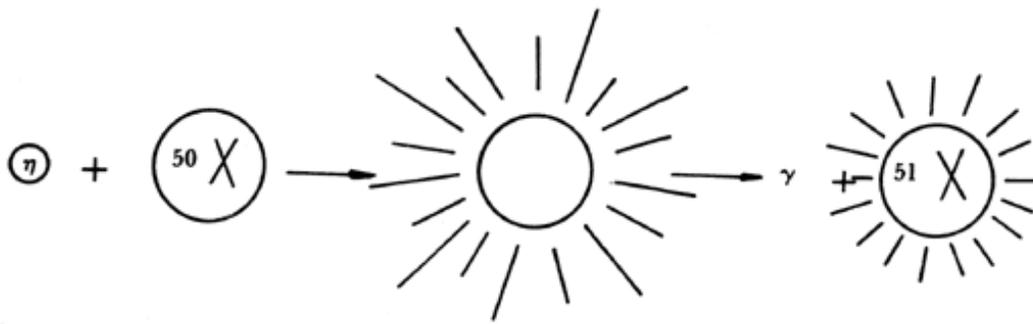


Figura III.5. Producción de isótopos radiactivos por irradiaciones con neutrones. El núcleo X captura un neutrón (n) para dar un núcleo compuesto. * el cual es a su vez se desintegra para dar un isótopo radiactivo.

El entusiasmo de Frédéric por este descubrimiento fue tal que empezó a saltar y correr en el laboratorio diciéndole a su colaborador Gentner: "Para el neutrón llegamos tarde, para el positrón llegamos demasiado tarde, pero esta vez llegamos a tiempo."

Llamaron a Marie Curie, quien llegó rápidamente acompañada de Langevin. Y, con el fin de verificar por sí misma el descubrimiento, tomó entre sus manos el tubo con el aluminio recién irradiado con las partículas α y lo colocó frente a su detector Geiger, que empezó a emitir señales indicando presencia de radiactividad por el ^{30}P producido artificialmente.

El fenómeno misterioso que Pierre y Marie observaron sin poderlo modificar fue inducido por sus hijos, facilitando con ello su estudio. Antes de morir, Marie Curie alcanzó a ver que la obra que ella y Pierre Curie habían realizado con tanto ahínco era coronada por el éxito: el descubrimiento de la radiactividad artificial realizado por su hija Irène y su yerno Frederic.

EL PREMIO NOBEL

La Academia de Ciencias de Suecia le otorgó el premio Nobel de química a Frédéric e Irène Joliot-Curie el 12 de diciembre de 1935 por sus trabajos sobre la síntesis de elementos radiactivos. Fue el tercer premio Nobel concedido a la familia.

El día en que se anunció oficialmente la concesión del premio Nobel a los Joliot-Curie, Irène, que no había olvidado la invasión de periodistas cuando premiaron a sus padres, se refugió en el mercado con su esposo, donde compró un mantel de plástico para su casa.

El matrimonio Joliot-Curie se volvió entonces tan popular en Francia como lo era anteriormente el matrimonio Curie; el rector de La Sorbona ofreció una gran cena en su honor. Marie Curie ya no se encontraba entre los presentes, pero la madre de Frédéric todavía asistió a este evento.

El dinero del premio Nobel les permitió mudarse del centro de París e instalarse en Sceaux, un suburbio Parisino, allí recibían a sus amigos los domingos por la tarde. Hacían reuniones sociales informales en las que acostumbraban jugar tenis, baraja, oír música, leer poemas, etc. A pesar de todas estas actividades, Irène anteponía sus obligaciones para con sus hijos sobre todas las otras; un día Frédéric comentó que el descubrimiento de la cámara de Wilson le parecía lo más grandioso del mundo, ya que permitía a los investigadores de esa época observar las trayectorias de las radiaciones emitidas por las fuentes radiactivas. Irène le contestó que ella estaría de acuerdo con él si no existiera la experiencia de la maternidad. No fue sino después de haber sido galardonados con el premio Nobel cuando Frédéric Joliot fue nombrado profesor en el Colegio de Francia e Irène profesora de la Universidad de París.

Mientras Frédéric debía trabajar en nuevos laboratorios, Irène continuaba en el Instituto del Radio. Es en esta época en la que la colaboración de los esposos se hizo menos estrecha. En 1936 Irène fue nombrada subsecretaria de Estado de la Investigación Científica. Aceptó este cargo para apoyar la investigación y demostrar la capacidad de la mujer para desarrollar este tipo de trabajos, y a que desde pequeña se había percatado de que los prejuicios de su época no permitían que las mujeres ocuparan el lugar que les correspondía en la sociedad. Por ejemplo, su madre

Marie Curie, no logró ingresar a la Academia de Ciencias de Francia, a pesar de haber sido galardonada dos veces con el premio Nobel.

LOS NEUTRONES, COMO PROYECTILES PARA EL URANIO Y EL TORIO

En el medio científico existía gran competencia entre los radioquímicos para descubrir nuevos elementos irradiando, principalmente con neutrones, elementos conocidos como el uranio y el torio, técnica que desde 1934 había utilizado Enrico Fermi para producir isótopos radiactivos (figura III.5).

En 1937 Irène Joliot-Curie en colaboración con Savitch, bombardeaba torio y uranio con neutrones para obtener elementos más pesados; observó que uno de los elementos obtenidos tenía las propiedades del lantano. Frédéric, Irène y Savitch discutieron largamente este resultado insólito, trataron de explicarlo como producido por el rompimiento del elemento irradiado en dos fracciones, pero después de muchas discusiones desearon esta hipótesis y publicaron únicamente que habían encontrado un elemento radiactivo que se podía separar junto con el lantano al usar éste como portador. *[Los portadores son elementos químicos que poseen las mismas propiedades que los átomos radiactivos que se desean separar, por lo que al utilizar lantano el elemento separado debería ser el mismo, o un elemento con propiedades químicas similares.]*

Las controversias y las discusiones que tuvieron los Joliot-Curie con Lise Meitner, excelente radioquímica, y con Otto Hahn, fueron conocidas por todo el medio científico. En particular Lise Meitner los criticaba porque en experimentos semejantes obtenían resultados diferentes de los del grupo francés. En 1938 Frederic se encontró con Otto Hahn en un congreso en Roma y le hizo saber que no creía que las medidas realizadas en Francia estuviesen bien hechas. Sin embargo, para confirmar sus propios resultados Otto Hahn repitió los experimentos en compañía de Strassmann, pero en esta ocasión sin la ayuda de Lise, que ya se encontraba refugiada en Suecia. En un principio, los científicos del grupo de Otto Hahn pensaban que el elemento separado por los Joliot-Curie era radio, pero se dieron cuenta de que utilizando bario como portador, elemento dos veces más ligero que el uranio, encontraban que el elemento radiactivo separado no se distinguía químicamente del bario. Verificando la técnica utilizada por Irène y Savitch, encontraron efectivamente lantano en la mezcla.

LA FISIÓN NUCLEAR

Los experimentos realizados y sus resultados fueron interpretados brillantemente por el grupo dirigido por Otto Hahn. Concluyeron que el uranio, al ser bombardeado con neutrones, se partía en dos y producía elementos más ligeros. Habían descubierto algo inconcebible según los conocimientos de esa época: el fenómeno de la fisión, el rompimiento del núcleo del átomo en fragmentos.

El artículo publicado por el grupo de Otto Hahn el 6 de enero de 1939 llegó a manos de Frédéric unos diez días después. Resulta fácil imaginar la nueva desilusión de los científicos franceses al saber que la idea que habían desechado era la respuesta a sus experimentos.

Dejando a un lado todas sus actividades, Frédéric se dedicó de inmediato a investigar el fenómeno recién descubierto de la fisión nuclear, en el que los neutrones al penetrar en el núcleo del uranio pueden fisiónarlo en partes, formando así isótopos de elementos diferentes al uranio, llamados *productos de fisión*. En pocos días llegó a dos conclusiones de primordial importancia: en primer lugar, que cada fisión nuclear debería liberar una cantidad de energía considerable y, en segundo lugar, que junto con los productos de fisión, tales como el bario o el lantano, con menos neutrones que el átomo de uranio original debería emitirse uno o varios neutrones en cada fisión. Con el propósito de comprobar estas hipótesis, Frédéric formó un grupo de trabajo en el Colegio de Francia con Hans Halban y Low Kowarski para dedicarse íntegramente al estudio de la fisión nuclear. Estos investigadores supusieron que el conjunto, de neutrones formados en la fisión es análogo a una población humana. Hay numerosos individuos que nacen, crecen y mueren sin haber tenido descendencia. Consideraron que éste es el caso de los neutrones que no producen fisión y que sólo son absorbidos por la materia; para que la población de neutrones en el material fisiónable se mantenga constante, cada fisión debe dar origen a más de un descendiente.

Joliot, Halban y Kowarski evaluaron la rapidez de natalidad de los neutrones, es decir, el número de neutrones emitidos por cada fisión que, consideraron, debería ser entre y cuatro: Ahora sabemos que ese número es más reducido: en cada fisión se liberan de dos a tres neutrones. Sus resultados mostraron la posibilidad de que los neutrones generados en la reacción de fisión pudieran producir más fisiones y dar origen a más neutrones y así

sucesivamente, haciendo posible la generación de reacciones en cadena. También señalaron el posible uso de la fisión para producir energía útil para la vida cotidiana y la industria pero, además, evidenciaron el peligro que representaba como arma bélica.

Así, el grupo formado por Joliot llegó a una nueva etapa en su trabajo. Después de la verificación del fenómeno de la fisión, del descubrimiento de la producción de neutrones, de la medición del número de neutrones por fisión, estudiaron la energía aprovechable producida por las reacciones de fisión nuclear en cadena. En esta nueva etapa, el grupo del Colegio de Francia competía en una carrera científica en la que participaban los países más poderosos de esa época, Gran Bretaña, Alemania y, después, Estados Unidos.

LA REACCIÓN EN CADENA

Después de muchos estudios llegaron a la conclusión de que podrían mantener una reacción en cadena de forma constante utilizando uranio enriquecido en uranio-235 o bien uranio natural (figura III.6). Para hacer funcionar un reactor nuclear con uranio natural era necesario contar con un material que les permitiera frenar los neutrones producidos a velocidades bajas, ya que sólo éstos son útiles en la fisión en cadena. Consideraron que el agua pesada era el material adecuado para moderar la velocidad de estos neutrones. Afortunadamente existía en Noruega una sociedad industrial que había utilizado agua pesada en sus procesos y todavía le quedaba cierta cantidad; Ya en plena segunda Guerra Mundial, y debido a la importancia que el agua pesada tenía en la creación de los reactores, Frédéric logró después de muchas vicisitudes que llegaron muy discretamente a París, el 16 de marzo de 1940, 92 kilogramos de agua pesada; toda la que existía entonces.

Los trabajos en los que estos científicos describieron la fisión como fuente de energía y su posible aplicación bélica fueron escritos en cinco informes secretos depositados en el Centro Nacional de la Investigación Científica de Francia (CNRS) entre los años 1939 y 1940.

LAS PERIPECIAS DEL GRUPO FRANCÉS EN LA SEGUNDA GUERRA MUNDIAL

El primero de septiembre de 1939 Alemania había invadido Polonia. Temiendo bombardeos alemanes sobre París, Frederic e Irene enviaron a sus hijos Pierre y Hélène a Arcouest. Durante este periodo los acontecimientos se sucedieron de manera incoherente y con mucha rapidez. Frédéric recibió órdenes de su gobierno de llevarse todo el equipo científico posible al sur de Francia, donde se pensaba correría menos peligro de ser capturado por los nazis, pero no fue sino hasta el 12 de junio de 1940 cuando Frédéric sacó los últimos equipos portátiles de su laboratorio, quemó los documentos y partió con Irène a Clermont-Ferrand. Sin embargo, pocos días después recibió órdenes de salir del país llevándose consigo el agua pesada, mientras el instrumental quedaba guardado en Burdeos, capital de la Tercera República Francesa. Frédéric organizó su partida junto con sus colaboradores Halban y Kowarski. Estos lograron partir a bordo de un carguero británico que los condujo a Inglaterra, pero ese día el puerto fue bombardeado y Joliot, al no poder pasar a través de los escombros, se quedó en Francia.

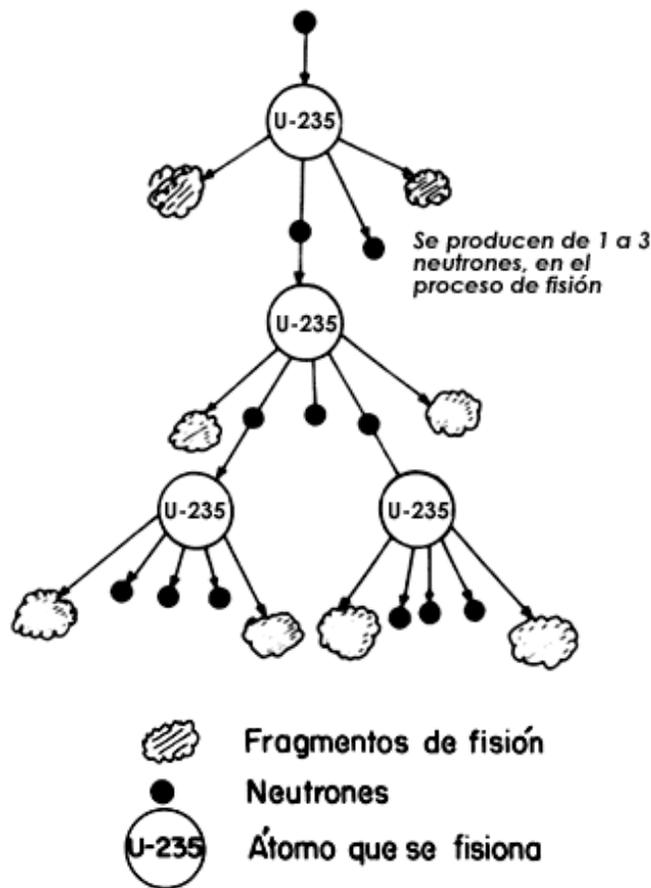


Figura III.6. Reacción en cadena producida en la fisión del uranio-235.

Halban y Kowarski llegaron a Londres el 22 de junio de 1940 y fueron a trabajar al laboratorio Cavendish de Cambridge. La única información que recibió Joliot durante la guerra fue un mensaje desde Suiza del padre de Halban en el que le informaba que su hijo había sido bien acogido en su nuevo medio y que trabajaba en excelentes condiciones. Halban y Kowarski decidieron que sería mejor llevar a cabo su trabajo en Estados Unidos o Canadá, para evitar interrupciones por la guerra. Así fue como Canadá y la Gran Bretaña llegaron a un acuerdo por el cual Canadá asumió la responsabilidad del grupo francés del Cavendish. Halban y Kowarski llegaron a Canadá en 1942 y Halban fue nombrado director de investigación.

Durante este periodo la pareja de científicos franceses Joliot-Curie se refugió en una pequeña ciudad de Burdeos. Fue allí donde, a mediados de julio, Frédéric recibió la noticia de que los oficiales alemanes estaban interesados en su laboratorio y regresó a París para intercambiar opiniones. El intérprete, en su primera conversación, fue Wolfgang Gentner, quien había trabajado bajo las órdenes de Joliot en el Instituto del Radio. Después de la entrevista, Gentner citó secretamente a Frédéric para hacerle saber que los alemanes pensaban llevarse el ciclotrón a Alemania.

Con esta información y con el propósito de no perder el equipo científico, Joliot decidió llegar a un acuerdo con los alemanes. Logró un convenio por el cual se le daba el nombramiento de director del laboratorio y se estipulaba que debía mantenerse informado de todos los trabajos allí realizados. Además, convenció a los alemanes de que se debían efectuar solamente investigaciones sobre ciencias básicas, excluyéndose cualquier programa militar.

Cuando Langevin fue arrestado el 30 de octubre de 1940 por sus actividades antinazis, Joliot reunió a los alumnos y profesores del Colegio de Francia para informarles que no dejaría entrar al Colegio a nadie, francés o alemán, hasta que su maestro fuera liberado. Fue Gentner quien obtuvo el acuerdo de las autoridades alemanas en París por el cual Langevin fue liberado y enviado a una residencia vigilada en Troyes. Los eventos de esta época llevaron a Joliot a unirse al movimiento de la resistencia francesa contra los alemanes.

El 29 de Junio de 1941 Frédéric fue arrestado por la policía y enviado a los alemanes bajo la acusación de ser comunista. Sin embargo, debido a las relaciones de Gentner fue liberado inmediatamente, a partir de ese momento estuvo continuamente bajo la protección de Gentner, aun cuando éste no quería tener conocimiento de sus

actividades antinazis. Entre éstas podemos citar la creación, en 1942, de la Sociedad de Estudio de las Aplicaciones de los Elementos Radiactivos Artificiales (SEDARS) , que tenía el propósito oculto de expedir certificados de trabajo a los jóvenes científicos franceses para evitar que fueran enviados a Alemania. La protección de Gentner duró hasta fines de 1943, cuando fue llamado a Alemania, ya que la Gestapo empezaba a dudar de su lealtad.

ESFUERZOS PARA LA PAZ

En ese mismo año, el secretario de Estado de la Producción Industrial le pidió a Joliot seguir con los estudios de la energía nuclear; como Frédéric sabía que estos trabajos podrían servir para fines bélicos y estaba resuelto a no participar en ellos, lo convenció de que era más importante realizar otros estudios básicos y formar el mayor número posible de investigadores.

En junio de 1944 muchos laboratorios clandestinos franceses se dedicaron a hacer explosivos, probablemente coordinados por Frédéric Joliot. Éste, viendo que la situación se agravaba en Francia, envió a su esposa e hijos a Suiza. Él, por su parte, se quedó en Francia.

Al finalizar la segunda Guerra Mundial el 2 de septiembre de 1945, los partidos políticos trataron de asegurar sus posiciones para las luchas internas. El partido Comunista puso a la cabeza del Centro Nacional para la Investigación Científica (CNRS) a Frédéric Joliot y en el momento en que De Gaulle llegó al gobierno como presidente interino, confirmó el nombramiento. Poco después, Frédéric comenzó a luchar por la fundación de un organismo para estudiar la energía nuclear y con este propósito se entrevistó con De Gaulle en mayo de 1945, sin obtener su apoyo. Sin embargo, después de las explosiones de las bombas atómicas estadounidenses en Hiroshima y Nagasaki fue llamado por el propio De Gaulle, quien le pidió su ayuda para la creación de un organismo dedicado al estudio de la energía nuclear. Así nació el 18 de octubre de 1945 la CEA (Comisión de Energía Atómica) de Francia. Frédéric quedó como el jefe de la Comisión e Irène encargada de la división de materias primas y prospección de uranio.

En 1946, año en que Irène fue nombrada directora del Instituto del Radio, regresaron de Canadá Kowarski, Goldschmith y otros científicos. El primero de ellos había trabajado en la instalación del primer reactor de agua pesada y el segundo en la separación de plutonio de los combustibles irradiados. Joliot los recibió emocionado y los tomó a su servicio en la CEA. Con la ayuda de estos científicos decidió instalar un reactor de agua pesada que se puso en funcionamiento el 15 de diciembre de 1948. En el otoño de 1949 se sacaron los primeros combustibles irradiados en el reactor y a fines de noviembre Goldschmith y su grupo obtuvieron los primeros miligramos de plutonio, elemento que no se encuentra en la naturaleza y que, como el U-235, es material fisionable.

Fue en 1949 cuando, gracias al esfuerzo de Frédéric e Irène Joliot- Curie, nació el movimiento mundial para la paz. Frédéric fue su presidente fundador e Irène participó también activamente en este movimiento. En esa época, el gobierno consideró oportuno desarrollar armas nucleares, pero la posición pacifista de los dos dirigentes más calificados de la CEA era inquietante; Frédéric e Irène habían declarado en varias ocasiones que jamás participarían en la fabricación de armas nucleares y esto llevó al presidente del Consejo Francés a retirar en 1950 a Frédéric de las importantes funciones que desempeñaba en la CEA; meses después tampoco se renovó el contrato de Irène. La desilusión de los dos científicos y patriotas franceses fue grande; sus actividades se redujeron, para Irène, a ser directora del Instituto del Radio y profesora de la Universidad de París y para Frédéric a ser director del Laboratorio y profesor del Colegio de Francia.

FALLECIMIENTO DE LOS DESCUBRIDORES

En 1942 Irène había solicitado un terreno para la construcción de nuevos laboratorios, pero no fue sino hasta 1955 cuando se adquirieron los terrenos de Orsay; desgraciadamente Irène no pudo ver su obra terminada, ya que después de unas vacaciones en la montaña, a principios de 1956, regresó a París para internarse en el Hospital Curie y murió de leucemia el 17 de marzo de 1956. El gobierno francés rindió honores nacionales a Irène Joliot-Curie y el discurso oficial fue una reivindicación pública por las injusticias cometidas en contra de esta gran científica.

Dos años después, el gobierno francés le hacía también magníficos funerales nacionales a Frédéric Joliot-Curie, quien murió el 14 de agosto de 1958 en su residencia de Arcouest después de terminar la última tarea de Irène, la construcción de Centro de Física Nuclear de Orsay.

BIBLIOGRAFÍA

E. Cotton, *Les Curie*. Col. Savants du Monde Entier, Pierre Segrhs (editor), París, 1963.

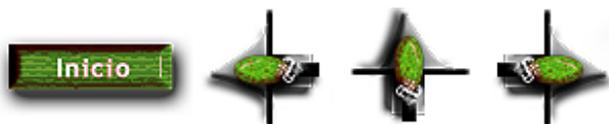
R. Menéndez P., *Gran Enciclopedia del Mundo*, Editorial Darvín, España, 1978.

S. Fernández-Valverde, "Transformaciones Nucleares", en *Revista Ciencia y Desarrollo*, núm. 23, 1978.

S.R. Weart, *La grande aventure des atomistes francaises*, Editorial Fayard, París, 1980.

S. Bulbulian y M. Jiménez-Reyes, *Naturaleza*, vol. 10, núm. 3, 1979.

S. Bulbulian y S. Fernández-Valverde, "Frédéric e Irène Joliot-Curie", *Revista Ciencia y Desarrollo*, núm. 48, 1983.



IV. PROPIEDADES DEL NEUTRÓN TÉRMICO

NURIA SEGOVIA ARIEL TEJERA

EL CONOCIMIENTO de las propiedades de los neutrones térmicos contribuyó en forma sustancial a la producción de radioisótopos y al desarrollo de la energía nuclear. A este respecto la Escuela de Roma fue una de las que más participaron en el estudio de la interacción de los neutrones térmicos con la materia, siendo Enrico Fermi su figura más destacada.

Enrico Fermi nació en Roma, Italia, el 29 de septiembre de 1901 en el seno de una familia perteneciente a la clase media baja. Su padre era administrador en los ferrocarriles, su madre tenía un firme sentido del deber y la disciplina, era inteligente y sentía gran devoción por su familia. Inculcó a sus hijos un concepto serio de la vida y el trabajo. Enrico aprendió a leer y a escribir desde muy pequeño, demostrando una retentiva prodigiosa al memorizar largos poemas. Asistió a la escuela pública desde los seis años. Era buen alumno, obtenía calificaciones altas y muy pronto demostró gran capacidad para las matemáticas, pues a los diez años ya comprendía problemas abstractos. A esa edad dejó la escuela primaria e ingresó al Gimnasio, el equivalente de la escuela secundaria y preparatoria, donde permaneció cinco años. La presión de trabajo era pesada aun para los alumnos más destacados. Su expediente académico sigue siendo en esta época excelente, posiblemente era el mejor estudiante de su clase. Además, debido a sus hábitos de orden y disciplina disponía de mucho tiempo libre que dedicaba, en gran parte, a sus estudios científicos. En esa época se expresaba con claridad porque su pensamiento era claro, pero aun en sus primeros artículos de 1927 y en su *Introducción a la física atómica* no hizo ningún esfuerzo por pulir su estilo descriptivo, utilizando un idioma plano y descuidado. Posteriormente, sin embargo, se volvió muy escrupuloso con respecto a usar un lenguaje muy preciso. A los catorce años compró varios libros de matemáticas y uno de física, titulado *Elementos de física matemática* de Andre Caraffa, escrito en latín y publicado en 1840.

Cuando Enrico cumple 18 años tiene ya una formación autodidacta en matemáticas y mecánica teórica equivalente a la que se adquiere en los primeros años de una carrera universitaria. Un amigo de su padre, el ingeniero Adolfo Amadei, asombrado por la precocidad del joven Enrico, le facilitó, durante cuatro años, libros sobre temas que comprendían desde trigonometría hasta mecánica teórica y análisis vectorial. Por recomendación de Amadei, Enrico se presentó a un concurso para ser admitido en la Escuela Normal Superior, dependiente de la Universidad de Pisa. Ganó el concurso escribiendo sobre el tema "Características del sonido", usando técnicas matemáticas propias de una disertación doctoral. En la Escuela Normal Superior se fomentaban los estudios avanzados y la investigación, actividades acordes al talento de Fermi.

En Pisa continúa su aprendizaje, principalmente autodidacta. En poco tiempo sus profesores no tuvieron ya nada que enseñarle y en su mayoría, tanto éstos como sus condiscípulos, reconocieron su extraordinaria capacidad. En 1921 publicó su primer artículo científico "Sobre la dinámica de un sistema rígido de cargas eléctricas en movimiento traslacional".

En 1922 presenta el examen de tesis universitario al que tenía derecho como alumno de la Escuela Normal Superior con el tema "La difracción de rayos X por cristales curvos y las imágenes obtenibles por este método", habiéndosele concedido el doctorado *Magna cum laude*. El diploma de la Escuela Normal lo obtuvo con la tesis titulada "Un teorema sobre la probabilidad y su aplicación en astronomía". En ese mismo año publica un artículo con el título "Sobre los fenómenos que ocurren en las cercanías de un meridiano terrestre", que confirma los profundos conocimientos que tenía de la relatividad general.

En 1923 da a luz un ensayo sobre "La masa en la teoría de la relatividad" en el que examina, entre otras cosas, la posible ubicación de la energía nuclear y la señala como la más espectacular consecuencia de la relatividad.

A finales de 1924 Fermi ocupó un puesto provisional en el laboratorio de física de la Universidad de Florencia, situado en Arcetri, lugar en el que Galileo pasó los últimos años de su vida. En 1925, junto con el físico Franco Rasetti, llevo a cabo una investigación de los efectos que tienen los campos magnéticos alternantes en las líneas espectroscópicas del vapor de mercurio.

Fermi leía ávidamente las revistas de física de circulación internacional, como la *Revista de Física Alemana*. Se enteró en este tiempo del descubrimiento del principio de exclusión, realizado por el físico austriaco Wolfgang Pauli, quien pudo explicar cómo se van completando los diferentes niveles atómicos a medida que aumentan los protones del núcleo. El principio enuncia que dos electrones del mismo átomo no pueden tener la misma energía y los mismos momentos angulares.

El principio de exclusión resultó tener una aplicación universal para los electrones y para las partículas, como protones y neutrones, que tienen un momento angular propio. A este momento angular propio o intrínseco se le llama espín. Pauli se dio cuenta de que aplicando el principio de exclusión a los electrones atómicos sólo podían acomodarse en cada nivel energético dos electrones con espines en direcciones opuestas. Un electrón adicional en este átomo tendría que acomodarse en otro nivel energético, con nuevos valores de energía o de momento angular o de orientación del momento angular y desde luego con su correspondiente espín. Este principio permitió, auxiliado por las características químicas de los elementos, entender y perfeccionar la tabla de Mendeleev.

Desde 1900 se había desarrollado el modelo del gas de electrones para los metales siguiendo el modelo clásico de los gases ideales. Fermi se había preocupado de este problema y al conocer el principio de exclusión de Pauli lo aplicó a un nuevo modelo de gas tomando en cuenta el espín, deduciendo una ley de distribución de energías que es diferente de la clásica.

Fermi publicó su investigación en un artículo denominado "Sobre la cuantificación del gas monoatómico ideal", fechado en febrero de 1926; este trabajo fue también presentado en una famosa academia científica italiana y más tarde publicado en la *Revista de Física Alemana* con gran éxito. Paul André Maurice Dirac, famoso físico inglés, llegó a las mismas conclusiones que Fermi partiendo de otro punto de vista. El descubrimiento de ambos físicos se conoce actualmente como la Estadística de Fermi-Dirac y a las partículas descritas se les llama fermiones.

En noviembre de 1926 Fermi ganó el primer lugar en un concurso que le permitió asumir una cátedra con carácter vitalicio en la Universidad de Roma.

LA ESCUELA DE ROMA

Uno de los fenómenos nucleares que atraían el interés de los físicos en ese tiempo era la emisión de electrones por algunos núcleos radiactivos. En particular, a los electrones de origen nuclear se les conocía desde principios del siglo con el nombre de partículas beta. Mientras se supuso que el núcleo estaba integrado por protones y electrones no pareció raro que se pudieran emitir estos últimos si el núcleo tenía un exceso de energía. Lo que llevó tiempo explicar fue que los electrones, en promedio, acarrean sólo la mitad de la energía que pierde el núcleo. Con el fin de mantener incólume el principio de la conservación de la energía, el físico Pauli inventó una partícula a la que Fermi bautizó con el nombre de neutrino. Esta es muy difícil de detectar, pero es capaz de llevarse la energía que le falte a un electrón emitido en una desintegración para completar la energía, característica que pierde el núcleo.

Surgió una nueva dificultad conceptual cuando se llegó a la conclusión de que las partículas que forman un núcleo son los protones y los neutrones dados a conocer estos últimos por Chadwick en 1932. Durante su estancia en Roma, Fermi obtuvo una excelente preparación en las nuevas teorías físicas nucleares y en sus complicados métodos matemáticos. Con el auxilio de las nuevas concepciones hizo una investigación cuyos resultados se publicaron en la *Revista de Física Alemana* con el título de "Búsqueda de una teoría de los rayos beta", en 1934. Se trata de una teoría que describe cuantitativamente la emisión de electrones y neutrinos por el núcleo, "como un caso análogo", dice el mismo Fermi, "al de la emisión de fotones por el átomo". La teoría de Fermi permite calcular teóricamente por primera vez cuánto tiempo se espera que pase para que un material emisor de electrones tarde en ir convirtiendo por decaimiento sus neutrones en protones, emitiendo betas y neutrinos (figura IV.1). Además permite también calcular cómo se va a distribuir la energía que cede el núcleo entre las dos partículas.

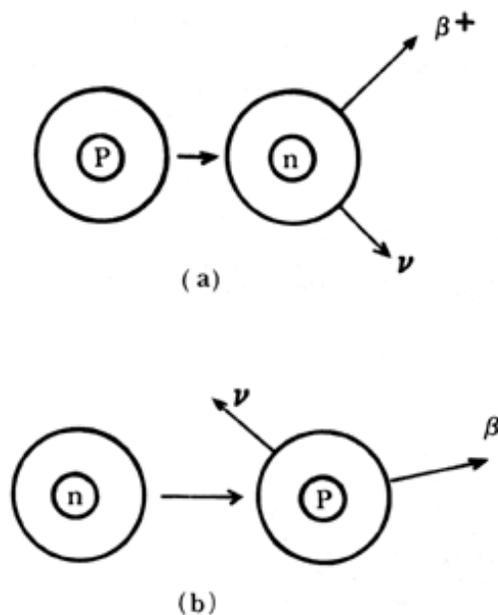


Figura IV.1 (a) en el decaimiento β^+ un protón del núcleo se transforma en neutrón, emitiendo un electrón positivo (β^+) y un neutrino ν . (b) En el decaimiento β^- un neutrón del núcleo se transforma en protón, emitiendo un electrón negativo (β^-) y un antineutrino $\bar{\nu}$.

En la Universidad de Roma existía un grupo de eminentes matemáticos considerablemente mayores que Fermi; sin embargo, el intercambio de ideas y la cooperación intelectual eran difíciles.

Desde sus años de Pisa, Fermi había luchado por introducir la física moderna en Italia. Para ello dio varios pasos, el primero publicar artículos sobre física moderna para un amplio sector del público, incluyendo maestros de enseñanza media. El segundo fue escribir un libro de texto sobre física atómica y el tercero seleccionar y preparar físicos jóvenes. Esto último, que era lo más importante, resultó ser lo más difícil. En efecto, el número de estudiantes de física en las universidades italianas era reducidísimo, ya que la física se enseñaba como materia complementaria a los ingenieros, químicos, médicos, etc. De las dos grandes innovaciones de esa época en física, la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica, sólo Fermi y el destacado físico Enrico Persico estaban familiarizados con ellas.

Cuando Fermi llegó, a Roma, intentó transformar el Instituto de Física en una institución de primera categoría que pudiera equipararse con las mejores del mundo. Una de las primeras tareas fue la de fortalecer la física experimental, lo cual resultó más difícil que, consolidar la física teórica debido a que requería apoyo técnico y financiero mucho mayor. Era manifiesta y urgente la necesidad en Roma de un físico experimental joven y activo, eligiéndose para esto a Franco Rasetti, quien llegó de Florencia a principios de 1927. Rasetti, en pocos años, logró reputación internacional por sus trabajos acerca del efecto Raman y montó un laboratorio de espectroscopía. Emilio Segré, Giovanni Enriques y Ettore Majorana se unieron en 1927 al grupo, pero era evidente que en términos científicos Fermi era la voz italiana más autorizada en física moderna. Fermi organizó un seminario con los jóvenes estudiantes donde se tocaban temas del interés de los integrantes. Segré afirmó que en esa época jamás tuvieron un curso regular.

Si le preguntábamos a Fermi sobre toda un área que ignorábamos él se limitaba a recomendarnos un buen libro sobre el tema. Sin embargo, si le preguntábamos sobre un tema específico, Fermi improvisaba una hermosa conferencia sobre la teoría. Uno recibía la impresión de que había estado estudiando por mucho tiempo y que había preparado cuidadosamente la conferencia. De esta manera se cubrían muchos temas en un nivel equivalente a los primeros cursos de posgrado de una universidad norteamericana.

Fermi, que por aquel tiempo trabajaba sobre todo en cuestiones teóricas, también se interesaba en los trabajos experimentales en el laboratorio de Rasetti. Este ejerció una influencia enorme sobre Fermi y el grupo en su conjunto.

La sede de toda esta actividad era el viejo laboratorio de física de la Universidad de Roma. Este edificio estaba

perfectamente adecuado para el tipo de trabajo científico que se desarrollaba en los años veinte. El equipo era aceptable, sobre todo en materia de espectroscopía óptica, e incluía algunos aparatos auxiliares de buena calidad. El taller era anticuado, pero la biblioteca excelente.

El conocimiento y los intereses de Fermi abarcaban toda la física. Prefería los problemas concretos y desconfiaba de teorías demasiado abstractas o generales; en cambio, cualquier problema concreto en cualquier área de la física lo fascinaba y constituía un reto para su ingenio. Un ejemplo notable de esta forma de proceder lo constituye su teoría cuántica de la radiación. Fermi, había leído los artículos de Dirac y comprendió los resultados que obtuvo. Sin embargo, el método empleado por Dirac era desconocido para Fermi por lo que decidió reformular la teoría de un modo que le fuera más familiar en términos matemáticos.

LOS NEUTRONES TÉRMICOS

Con el descubrimiento del neutrón por Chadwick en 1932, se abrió la posibilidad de bombardear los núcleos con un proyectil de muy intensa acción nuclear sin que fuera rechazado por las cargas eléctricas nucleares.

La técnica para construir una fuente de neutrones empleada por Enrico Fermi fue encerrar, en un tubo de vidrio hermético, polvo de berilio en una atmósfera de radón (figura IV.2). Esta fuente emitía 1 000 000 de neutrones por segundo, cuyas energías individuales estaban repartidas desde cero hasta unos 8 000 000 de electrón-voltios. Las fuentes actuales de neutrones se fabrican usualmente de berilio mezclado con radio, americio o plutonio, o bien, son de californio. En el laboratorio de Roma, Fermi y sus colaboradores sometieron al bombardeo con neutrones no solamente a los elementos ligeros que se habían logrado transmutar ya con las partículas cargadas, como protones, de neutrones y partículas alfa, impulsadas en los primeros aceleradores de partículas, sino que también fue posible transmutar elementos más pesados. De hecho, para 1938 habían sometido al flujo de neutrones la mayor parte de los elementos conocidos. En estos experimentos se había descubierto que para un buen número de elementos el bombardeo producía el isótopo de número atómico inmediato superior al elemento bombardeado, es decir, que algunos elementos capturaban un neutrón incidente, convirtiéndose en un radioisótopo del mismo elemento y este era, por lo general, emisor de partículas beta negativas. En 1934 Fermi descubrió que frenando los neutrones a través de una placa de parafina aumentaba hasta cientos de veces su poder de activación, como en el caso de la plata (plata natural-109), que al absorbe un neutrón se transmuta en el isótopo radiactivo plata-110 que decae, emitiendo betas negativas, en cadmio-110 (figura IV) Este mismo tipo de reacción se había observado también en los isótopos vanadio-51, manganeso-55, cobre-63, arsénico-75, bromo-79, yodo-127, iridio-191 y 193, oro-197, etc. Fermi había descubierto la efectividad de estos neutrones, que se denominaron térmicos.

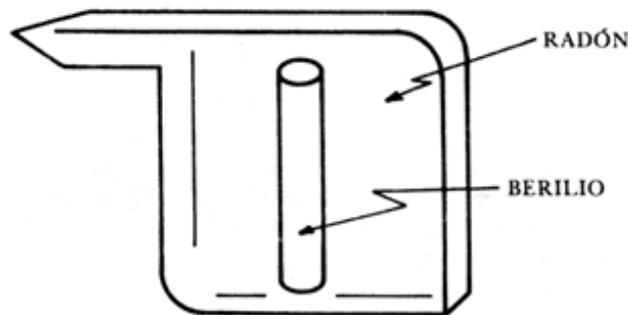


Figura IV.2. dibujo esquemático de una fuente de neutrones de radón-222 y berilio-9. La reacción es: Berilio-9 + α \rightarrow carbono - 12 + energía.

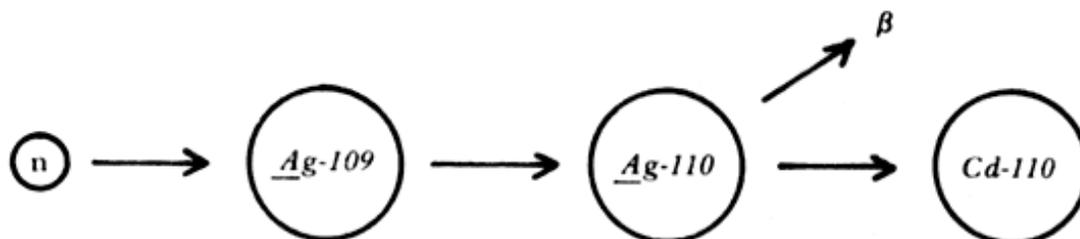


Figura IV.3. Transmutación de un isótopo de plata, por absorción de un neutrón térmico, en un isótopo de cadmio. La reacción es: Plata - 109 + n \rightarrow plata - 110 \rightarrow cadmio - 110 + β^-

A medida que los investigadores sometían elementos cada vez de mayor número atómico al flujo de neutrones se preguntaban: ¿Qué pasaría cuando llegaran al más pesado, al uranio? La respuesta esperada era la producción de elementos transuránicos, con número de masa mayor que los 238 nucleones del uranio y con más protones que los 92 de este elemento. Si esto llegara a suceder con el uranio, sería de esperarse la formación del isótopo 239 del uranio, que por desintegración beta generaría un nuevo elemento, con 93 protones y quizás, si este nuevo elemento no resultara estable, se podría esperar que a través de sucesivos decaimientos beta se obtuvieran elementos transuránicos de número atómico mayor que el 93. En junio de 1934 Fermi publicó en *Nature* un artículo sobre sus investigaciones en la Universidad de Roma con el título "La posible producción de elementos de número atómico mayor a 92". Entre otros comentarios importantes hace notar que de 68 elementos bombardeados con neutrones había logrado activar 47, de estos elementos, en el caso del aluminio, cloro y cobalto, el radioisótopo formado por bombardeo resultó ser el de un número Z-2. En el caso del fósforo, azufre, hierro y cinc, el número atómico del elemento formado fue Z-1. En los casos del bromo, el yodo y la plata, el producto fue un isótopo del elemento bombardeado. En algunos casos se alcanzó un estado estable mediante la transformación de un neutrón del núcleo bombardeado en un protón, y la expulsión de un electrón negativo, pasando el elemento de Z a Z+1 (figura IV.4).

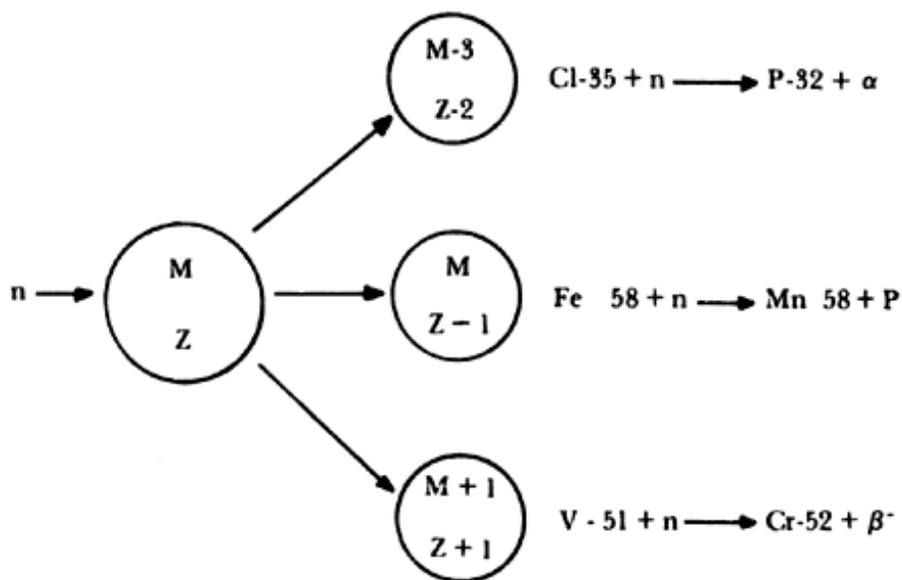


Figura IV.4. tipos de reacciones nucleares que dan lugar a la radiactividad artificial. Z es el número atómico correspondiente al número de protones del núcleo original de masa M.

En los casos en que se bombardeó con neutrones al uranio y al torio, se descubrió que se activaban muy intensamente dando lugar a una serie compleja de radioisótopos. En el caso del uranio bombardeado se detectaron emisiones beta con vida media de 10s, 40s, 13 m, y por lo menos dos emisores beta adicionales con vida media comprendida entre 40 minutos y un día. Las investigaciones de Fermi y sus colaboradores para identificar el producto de 13 minutos eliminaron a posibles isótopos adyacentes. La conclusión de Fermi fue que posiblemente se había formado el elemento 93, y sugirió la posibilidad de que también podían estar involucrados los elementos 94 y 95. El esfuerzo de los investigadores de este acertijo se orientó hacia la separación e identificación irrefutable de los transuránicos y entraron en competencia el grupo de Joliot-Curie en Francia, el de Hahn en Alemania y el de Fermi en Italia.

Durante cuatro largos años se mantuvo la hipótesis de los transuránicos, publicándose docenas de artículos sobre el tema, incluso un trabajo de la señora Ida Noddack, quien consideró débil la conclusión de Fermi de que se había formado un elemento transuránico, ya que antes de llegar a esta conclusión extrema se tenían que eliminar primero todos los elementos de la tabla periódica, pensando que el uranio hubiera podido estallar de alguna manera y formar otros elementos más ligeros. Esta aguda observación, que de haberse examinado con cuidado habría aliviado el penoso y frustrante trabajo de cuatro años, no fue considerada en su justo valor porque era contraria a los conceptos de estabilidad nuclear de aquella época.

En el año de 1938 Fermi recibió el premio Nobel por sus trabajos con neutrones térmicos y, debido a la situación política que se presentaba en Europa y a que su mujer era de origen judío, ya no volvió a Roma después de la visita a Estocolmo y viajó a Estados Unidos. Mientras Fermi huía de Europa, el grupo de los alemanes trabajaba y

descubría la fisión nuclear.

La noticia de la fisión nuclear propuesta por Lise Meitner y Otto Hahn (véase el capítulo V) la recibió Niels Bohr de boca de Otto Frisch en los primeros días de enero de 1939, cuando abandonaba Copenhague en viaje a Estados Unidos. Pronto se dio cuenta de que había que añadir un producto de reacción nuclear más en la lista de posibles decaimientos nucleares, y de que al lado de la emisión de partículas alfa o gamma hay un lugar natural para la fisión nuclear.

Hacia fines de 1939 era evidente que la enorme energía producida en la fisión nuclear podía aprovecharse en una reacción en cadena gracias a los neutrones liberados en estos eventos y así se hizo público en el ambiente científico europeo.

LA CARRERA MÁS TRÁGICA DEL SIGLO

En 1936, dos años antes de descubrirse la fisión, la opinión muy autorizada de E. Rutherford fue que no había ninguna posibilidad de producir energía nuclear que pudiera ser de utilidad; pero no todos los físicos se adherían a este punto de vista e inmediatamente después de que el grupo de Berlín anunció la fisión y ésta fue confirmada experimentalmente por Otto Frisch en febrero de 1939, se dieron cuenta de que la tan largamente esperada posibilidad había llegado. La conclusión del profesor Frisch fue confirmada en varios laboratorios de Estados Unidos, entre otros, por los de las Universidades de Columbia y de California, antes de que terminara el mes de febrero.

Muchos científicos que sintieron amenazada su libertad e incluso su vida abandonaron Europa y algunos se refugiaron en Estados Unidos. Entre éstos, Enrico Fermi encontró acomodo en la Universidad de Columbia y Albert Einstein en la de Princeton.

Como aún no había caído el telón del secreto sobre la energía nuclear, en la reunión de primavera de la Sociedad de Física Norteamericana, en abril de 1939, se discutió abiertamente la fisión del uranio-235 eslabonado a una reacción en cadena mantenida con los mismos neutrones producidos al fisionarse. Niels Bohr dijo que bastaba bombardear con neutrones térmicos una pequeña cantidad de uranio-235 para producir una explosión nuclear lo suficientemente potente como para volar el laboratorio y todo lo que estaba a su alrededor.

Los trabajos científicos sobre la fisión nuclear abrían la puerta para la producción de neutrones unidos a este fenómeno. En los meses inmediatamente posteriores al artículo aparecido en una revista alemana de ciencias de la naturaleza (1939) en la que Hahn y Strassmann dieron a conocer la fisión, quedaron establecidas las bases teóricas y experimentales que llevarían en los años siguientes a la construcción del primer reactor nuclear.

La idea básica para la reacción en cadena fue aislar en bloques diferentes el uranio y el material moderador destinado a frenar los neutrones rápidos que se produjeran por la fisión, de manera que estos neutrones por colisiones sucesivas perdieran energía, volviéndose térmicos, y pudieran así emerger del moderador para incidir a su vez en los bloques de uranio produciendo, algunos de ellos, nuevas fisiones. Éstas, a su vez, producirían nuevos grupos de neutrones rápidos que seguirían el mismo proceso anterior, manteniendo la reacción. El uranio que se utilizó fue principalmente uranio metálico y sus óxidos. El uranio natural es una mezcla de los isótopos 238, 234 y 235 en una proporción del 99.276%, 0.7196% y 0.0057% respectivamente. El uranio-238 es útil para la producción de plutonio-239; el uranio-235 es altamente fisionable por neutrones termalizados y en la práctica no se toma en cuenta el uranio-234 por su baja proporción. En un material moderador los neutrones rápidos provenientes de la fisión pierden energía por colisiones sucesivas. Son buenos moderadores aquellos que absorben un mínimo de neutrones. Ejemplo de éstos son el berilio, el deuterio (usado como agua pesada), el grafito y, en mucha menor medida, la parafina. En cambio, el cadmio y el boro son poderosos absorbedores de los neutrones térmicos, y en menor proporción el hidrógeno, usado frecuentemente como agua natural.

Durante 1941, en la Universidad de California se produjeron neutrones bombardeando un blanco de berilio con un haz de deuterones y fueron termalizados al pasar por un bloque de parafina al que se había incorporado 1.2 kg de nitrato de uranio. Se produjo, por reacción nuclear; neptunio-239, el que por decaimiento radiactivo beta produce plutonio-239. El plutonio-239 es un emisor de partículas alfa y tiene una vida media de 24 360 años; el neptunio-239 decae por varios grupos de partículas beta con una vida media de 2.35 días. Debido a esto una muestra de neptunio-239 al cabo de un mes se ha convertido casi toda en plutonio (figura IV.4).

Después de dos días de bombardeo se produjo medio microgramo de neptunio, que al decaer en plutonio se sujetó a

la prueba de fisión sosteniéndolo a un flujo de neutrones térmicos. El resultado fue sorprendente, el plutonio-239 era 50% más fisionable que el mismo uranio-235. Esto sucedió el 28 de marzo de 1941.

Debido al secreto voluntario que se impusieron los investigadores del grupo de la Universidad de California, este descubrimiento no se hizo público sino hasta después de que terminó la segunda Guerra Mundial.

Aquellos neutrones que fueran capturados dentro del uranio pasarían a convertir el uranio-238 en valioso plutonio. Este descubrimiento abrió la posibilidad de producir un segundo explosivo nuclear en el combustible mismo de un reactor. El diseño del reactor tendría que ser tal que se pudiera mantener la reacción en cadena al mismo tiempo que se produjera la máxima cantidad de plutonio. Se veía bien claro que el éxito iba a depender de la pureza de los materiales y del buen diseño.

Los primeros cálculos mostraron que el aprovechamiento y la producción de los neutrones dependía del volumen del reactor y que una de las pérdidas importantes se iba a deber a la superficie de éste; por lo que existe un volumen crítico de uranio y moderador por debajo del cual no hay reacción en cadena.

Los cálculos y la experiencia pusieron un límite inferior de varias toneladas de uranio y moderador, lo que creó un problema técnico de muy difícil solución, porque en aquella época la producción de uranio de la pureza necesaria era prácticamente nula comparada con las cantidades requeridas. Como moderadores se ensayaron en un principio el grafito y el berilio; más tarde se dispuso de agua pesada en cantidad suficiente como para ensayar un reactor prototipo. La decisión en este tiempo recayó sobre el grafito y éste fue el moderador que se usó por varios años.

LOS BLOQUES SUBCRÍTICOS

Las tres instituciones de los *EUA* más activas en el problema de la fisión en esta época eran las Universidades de California, Columbia y Princeton. Antes de que terminara 1941 se habían construido en la Universidad de Columbia bloques de grafito en los que se introducían fuentes de neutrones, con el fin de determinar en qué forma descendía su energía. Más adelante se incluyó uranio en el bloque con el fin de determinar el número de neutrón es que se producían en la fisión. Uno de estos bloques experimentados en julio de 1941 consistió en un cubo de grafito de unos dos metros y medio de lado, que contenía 2 toneladas de óxido de uranio. Con él, Fermi y sus colaboradores intentaron determinar el factor de reproducción de los neutrones debido a la Fisión. Si este factor era menor a la unidad indicaba que el número de neutrones perdidos era mayor que el de los producidos por la fisión, y si era mayor a la unidad era la señal esperada de que el número de neutrones que se producían en la fisión quedaba por encima de los que se perdían por impurezas en el grafito, captura en el uranio-238 o fuga por las paredes y, por lo tanto, podían producir la reacción, en cadena. A pesar de que era obvio que estos bloques de grafito eran demasiado pequeños para sustentar dicha reacción servirían indudablemente para calcular el tamaño crítico de un reactor y también para ensayar la pureza de los materiales nucleares.

Al finalizar 1941 los experimentos efectuados con los bloques permitieron concluir que los materiales aún no eran de suficiente calidad y por esta razón no se pudo determinar con precisión el diseño óptimo del reactor crítico, es decir, aquel que mantiene la reacción en cadena.

Tras el ataque a Pearl Harbor, el 7 de diciembre de 1941, los Estados Unidos entraron a la segunda Guerra Mundial.

El 13 de agosto de 1942, el ejército de Estados Unidos decidió tomar parte en el desarrollo de un explosivo nuclear y se creó el Proyecto Manhattan (*Manhattan Engineer District*) con la meta de producir energía nuclear con fines militares antes que Alemania.

LA PILA

Para julio de 1942, la industria había aumentado significativamente la producción de uranio de calidad nuclear, logrando obtener toneladas de material, y se había mejorado el grafito, obteniéndose un producto que absorbía 200% menos neutrones que el mejor producto fabricado antes.

Los esfuerzos separados de la Universidad de Columbia, con Fermi y la Universidad de Princeton, con E. Wigner, se unieron en la Universidad de Chicago con el nombre de Laboratorio de Metalurgia, nombre que sirvió para encubrir el de Proyecto Plutonio. Este laboratorio fue dirigido por el premio Nobel A. H. Compton. En este laboratorio, después de varias pruebas, se lograron ensayar los nuevos materiales. Los datos obtenidos indicaron que los materiales y el diseño eran lo suficientemente buenos como para iniciar la construcción de un reactor

nuclear.

Para el 7 de noviembre de 1942 se habían acumulado aproximadamente ocho toneladas de uranio natural muy puro, en uno de los salones para jugar frontenis del estadio Stagg Field de la Universidad de Chicago. Además se tenían varias toneladas de óxido de uranio y de grafito, cortado este último material en bloques de unos cuarenta centímetros por lado. El acto de apilar los bloques de grafito originó el nombre de *pila* para este primer reactor; nombre que no sugería nada de lo que estaba pasando en los sótanos del estadio.

Presionados más por la disponibilidad del material que por el diseño óptimo del reactor, se decidió apilar los bloques de grafito en una configuración esférica sostenida por una estructura de madera. El uranio se intercalaba entre los bloques de grafito hasta formar un cubo.

Por recomendación del profesor Compton, la pila iba a quedar encerrada herméticamente dentro de la cubierta cúbica de un globo aerostático, con el objeto de hacer el vacío en ella y disminuir la captura de neutrones por el nitrógeno del aire, condición supuesta para alcanzar el punto crítico.

A fin de controlar el número de neutrones que se produciría en la pila se dispuso de un buen número de detectores de neutrones y se insertaron barras de cadmio y de acero boratado capaces de absorber los neutrones producidos por la fisión y evitar que la pila quedara fuera de control. Durante el mes de noviembre se procedió a colocar capas de grafito y de uranio procurando que entre los lingotes de uranio se intercalaran unos cuarenta centímetros de grafito. El uranio metálico ocupó el centro de la pila y el óxido de uranio sirvió para completar el cubo.

El primero de diciembre se terminó la undécima capa y la esfera alcanzó tres cuartas partes del volumen total. Ya entrada la noche, al iniciarse la colocación de la undécima capa, alguien creyó oír que los marcadores acústicos de neutrones indicaban un ascenso y el encargado en turno, el doctor Zinn, se dio cuenta de que se estaban acercando al punto crítico antes de que se llegara a terminar la esfera. Al día siguiente, el 2 de diciembre de 1942, ante la presencia de los doctores Fermi, Szilard, Anderson, Weil, Compton, Winger y otros más, una vez terminada de colocar la duodécima capa de grafito y uranio y de asegurarse de que los sistemas de control funcionaban satisfactoriamente, se procedió a extraer todas las barras de control menos una, de cadmio, que se utilizó como control fino. Ésta era la primera vez que se manipulaba un reactor nuclear y nadie sabía a ciencia cierta qué iría a pasar. Desde luego, no se esperaba una explosión nuclear si el reactor quedaba fuera de control, por lo menos no de la envergadura de una bomba. Quizás, si algo iba mal, el reactor se calentaría demasiado y los gases calientes arrastrarían vapores de uranio contaminando un área grande. Con el fin de aumentar las medidas de seguridad, dos jóvenes estudiantes se ofrecieron como voluntarios para vigilar el reactor desde una plataforma, durante el acto de llevarlo al punto crítico teniendo cada uno en las manos una cubeta con una solución concentrada de sales de cadmio, y estuvieron alertas para sofocar cualquier aumento inesperado en la actividad.

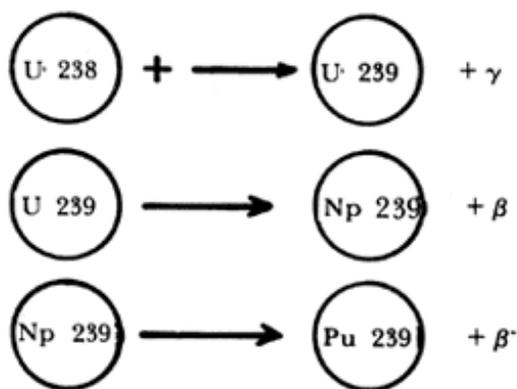


Figura IV.5. Producción de plutonio-239 a partir del bombardeo de uranio-238 con neutrones. El uranio-239 decae a neptunio-239 emitiendo betas negativas con una vida media de 23.5 minutos. El neptunio-239 decae a plutonio-239 emitiendo betas negativas con una vida media de 2.34 días.

Después del refrigerio, los científicos se reunieron en el improvisado laboratorio del reactor y con todas las otras barras de control fuera, se procedió a sacar la última muy lentamente, durando esta operación dos horas. El número de neutrones contados fue aumentando a medida que esta última barra se extraía de la pila, y cada vez el aumento en el número de neutrones era mayor al anterior. Para las tres y media de la tarde el aumento era tan grande que no

quedó ninguna duda de que el reactor había alcanzado su punto crítico. Por primera vez el fuego de la fisión había ardido sobre la Tierra. Todas las barras fueron introducidas de nuevo en la pila y la última capa, la decimotercera completó el primer reactor nuclear.

¿En que etapa irían los alemanes? ¿Ya estaría funcionando su reactor? Era indiscutible que dada la calidad de los técnicos y científicos alemanes, y disponiendo de una industria de primera calidad, podrían haber contado desde varios años atrás con el apoyo económico suficiente para llevar una gran delantera a los aliados. Se sabía que en el Instituto Wilhelm Kaiser se habían reunido doscientos científicos bajo la dirección del profesor Weizsaecker, uno de los descubridores de las reacciones nucleares en las estrellas. En mayo de 1940, Noruega fue ocupada por tropas alemanas que se adueñaron de la planta, productora de agua pesada de Vemork, exigiendo que aumentara la producción a 1.5 toneladas anuales en 1940 y a tres toneladas anuales en 1942. El 28 de febrero de 1943 un grupo de comandos aliados atacó con éxito la planta y destruyó la sección de alta concentración resguardada en los sótanos de la planta, derramando una considerable cantidad de agua pesada. El 13 de noviembre, un grupo de bombarderos de Estados Unidos atacó la planta hidroeléctrica y la de electrólisis, perdiendo los alemanes parte de las instalaciones, por lo que decidieron trasladar el equipo restante a Alemania. Los aliados hundieron en febrero de 1944 el ferry noruego en que se transbordaban varias toneladas de agua pesada hacia los laboratorios alemanes, cantidad que hubiera servido para intentar seriamente la construcción de un reactor nuclear crítico.

A partir de 1942 los grupos ingleses que estaban investigando y diseñando, en las diversas etapas de los reactores, la separación gaseosa del uranio-235 y el ensamble del explosivo nuclear, se trasladaron a Canadá y a Estados Unidos, contribuyendo al esfuerzo militar norteamericano.

LOS ÚLTIMOS AÑOS DE FERMI

En 1953 Fermi (figura IV.6) efectuó su último experimento sobre la dispersión pion-neutrón y en el verano de ese año analizó los datos en Los Álamos. En 1953 y 1954 escribió algunos artículos teóricos sobre el origen de los rayos cósmicos, la producción múltiple de piones y sobre la aplicación de las computadoras en un experimento teórico sobre las soluciones de los problemas de vibración no lineal. Se inician en Rochester, Berkeley y Chicago experimentos acerca de la polarización de protones en dispersión de alta energía. Fermi estaba interesado en ver si el acoplamiento de órbitas y espín podía ser responsable de la polarización de la dispersión de alta energía. El borrador de su último artículo fue sobre la "Polarización de protones de alta energía dispersados por núcleos".

Fermi murió el 29 de noviembre de 1954, a los cincuenta y tres años, en Chicago.

Sus logros más importantes fueron: el descubrimiento de la estadística que lleva su nombre, la teoría de los rayos beta y el trabajo experimental sobre los neutrones.

La estadística de Fermi-Dirac, descubierta independientemente por Dirac fue la clave para establecer la teoría de los metales y los modelos estadísticos del átomo y del núcleo, aunque el principio de Pauli es el concepto fundamental en ese campo.

La importancia de la teoría de los rayos beta ejerció una notable influencia en el estudio de las partículas elementales. Ésta fue la contribución más importante que hizo Fermi en el campo de la física teórica.

El trabajo sobre los neutrones fue fundamental por el descubrimiento de los neutrones térmicos, y a partir de él se logró realizar la reacción en cadena, que dio lugar al control de la energía nuclear.

Fermi se dedicó por entero a la ciencia. Fue un individuo que llegó a las más altas cumbres tanto en lo teórico como en lo experimental y que dominaba toda la física.

La influencia de Fermi en la física italiana fue enorme. Al introducir la física teórica en la formación académica inició un movimiento que en poco tiempo sacó a Italia del atraso en que se encontraba, para colocarla en una situación de prestigio en el campo de la física. La importancia de Fermi en Estados Unidos también es notable, aunque en menor grado. Sin embargo, uno de los laboratorios más importantes y reconocidos actualmente es el Fermi Lab de Los Álamos.



Figura IV.6. Enrico Fermi en la década de los años cuarenta. Dibujo de Ariel Tejera y Olaf Rivera.

REFERENCIAS

G. Hermann, *Five Decades Ago: From the "Transuranes" to Nuclear Fision*. Angem. Chema. Int., Ed. Engl., 29 481-508, 1990.

Segre, E. Fermi, CONACYT, 1987.

H. W. Smith, *Atomic Energy for Military Purposes*, Princeton University Press. 1948.



Inicio

V. LA FISIÓN NUCLEAR: OTTO HAHN Y LA ESCUELA ALEMANA

PEDRO-BOSCH GIRAL

INTRODUCCIÓN

"Hoy que vamos de picada añoramos el momento cuando íbamos en ascenso", le hace decir Carlos Fuentes al narrador de *El prisionero de Las Lomas*. ¡Cuántas veces, cada uno de nosotros se ha lamentado del mismo modo! Y sin embargo, nuestra crisis resulta menor si se la compara con los acontecimientos que se produjeron en Alemania durante la vida de Otto Hahn. Por eso, en más de un aspecto, para los que nos ha tocado vivir en "tiempo de austeridad", la vida de Otto Hahn es ejemplar.

Hahn nació el 8 de marzo de 1879 en Francfort del Main y murió el 28 de julio de 1968 en Gotinga, Alemania. O sea que en su juventud disfrutó la prosperidad alemana de la posguerra del conflicto franco-prusiano, pero a los 35 años tuvo que enfrentarse con la primera Guerra Mundial y a los sesenta con la segunda.

Hahn vivió cambios sociales y políticos tan radicales como los que simultáneamente se produjeron en el campo de la física y de la química. Comprobó cómo de la mecánica newtoniana hubo que pasar a la relativista y, en el campo de la radiactividad, supo del descubrimiento del radio en 1896 por Henri Becquerel (1852-1908, premio Nobel de física en 1903) y del uso rutinario de las centrales nucleares en los sesentas.

EL AVENTURERO

Otto Hahn "quemó las naves" en más de una ocasión para lanzarse a lo desconocido. Y tenía a quién parecerse: su padre, de origen campesino, que pudo haber seguido la tradición agrícola de la familia, prefirió hacerse vidriero comprando su propia tienda y estableciéndose en Francfort. Su promoción de artesano a hombre de negocios coincidió con la bonanza que se produjo en Alemania después de la Guerra Franco-Prusiana (1870-1871). Los Hahn se convirtieron, entonces, en una respetable familia de la clase media que insistía en vivir austeramente. Sin embargo, esta prosperidad económica se veía nublada por la mala salud del pequeño Otto, que le duró hasta los catorce años.

En el colegio; y durante el bachillerato, Otto Hahn fue un estudiante común y corriente a quien le interesaba la química. Esta vocación se confirmó cuando asistió a una serie de conferencias para adultos sobre el tema. Igual que su padre, no quiso seguir los caminos trillados: Otto se enfrentó a los deseos familiares, que querían verlo arquitecto, e ingresó a la Universidad de Marburgo en 1897 en la carrera de química. Su vida de estudiante transcurrió más en las cervecerías que frente al profesor de matemáticas o de física, según él mismo lo relata. Se dice que de aquel entonces le vino el gusto por el tabaco. A menudo se "iba de pinta" para asistir a conferencias de arte o de filosofía, y, desde luego, los encuentros románticos no faltaron.

Así y todo, en 1901 obtuvo el doctorado y después de pasar un año en la infantería volvió a Marburgo. Hahn consiguió entonces empleo de asistente de su profesor principal, Theodor Zincke. No está por demás subrayar que estos empleos eran muy disputados ya que se les consideraba trampolín obligado para ingresar a la industria. En efecto, la recomendación de un profesor determinaba la obtención de una plaza en las compañías químicas alemanas que, en aquella época, eran las más poderosas y avanzadas. A Hahn le ofrecieron un contrato que requería del dominio de un idioma extranjero. Por eso, con su propio dinero, se fue a Inglaterra en septiembre de 1904. Como Zincke no quería que permaneciese inactivo, le consiguió un lugar en Londres, en el University College con sir William Ramsay (1852-1916, premio Nobel de química en 1904), famoso por haber descubierto varios gases inertes.

UN HOMBRE CON SUERTE

Ramsay, en esa época, se interesaba en la radiactividad y contaba con la colaboración de Frederick Soddy (1852-1916, premio Nobel de química en 1904) que había trabajado con E. Rutherford. Sin embargo, como sucede frecuentemente, a Ramsay le faltaban ayudantes. Sin pensarlo dos veces le extendió a su joven visitante unos 100 gramos de bario para que de ellos extrajera los pocos miligramos de radio que contenían. El método a seguir era el de Marie Curie. Desde luego Hahn, que era químico orgánico, le explicó que desconocía el tema. Ramsay replicó

que tendría entonces la ventaja de abordarlo sin ideas preconcebidas y que, además, preparando un compuesto orgánico (lo cual alimentaría notablemente la cantidad total de material estudiado) podría calcular el peso atómico a partir de los pesos moleculares. Así intentarían confirmar la determinación de Curie. El método inicialmente usado por los Curie para separar elementos radiactivos y determinar sus propiedades químicas consistía en poner en solución la sustancia radiactiva con otros cuerpos y usar varios agentes precipitadores. Se probaba, entonces, si el precipitado o la solución o ambos eran radiactivos. Suponiendo que ambos lo fuesen, se trataba entonces cada parte de un modo análogo, y se repetía el proceso hasta que una parte de los productos no fuese radiactiva y la otra parte presentara un decaimiento exponencial con la vida media característica. Los Curie aislaron así el radio (1898) a partir de la pechblenda mineral.

En el juego como en el amor, se habla de "la suerte de los principiantes" y de los "bandazos de la fortuna". En la vida de Hahn el primer bandazo fue aceptar llevar a cabo esa extracción, cambiándose de la química orgánica a la radiactividad, y la suerte de principiante fue la de enfrentarse con un material que contenía un alto porcentaje de torio además del uranio. Otto Hahn siguió la técnica de separación al pie de la letra y descubrió un nuevo radioelemento: el radiorio, que de hecho era un isótopo del torio, pero en aquel entonces la existencia de los isótopos de los elementos todavía no se conocía.

Isótopos

A principios del siglo pasado Prout (1785-1850) propuso que todos los átomos, en última instancia, estaban constituidos por átomos de hidrógeno. Esta hipótesis cayó en el olvido ya que el peso atómico de todos los elementos debería ser un número entero de veces el del hidrógeno. Sin embargo, eso no sucede. Un ejemplo contundente es el del cloro, cuyo peso atómico, si el del hidrógeno es 1, es de 35.5. Debido a los fenómenos observados al estudiar la radiactividad, hubo que concluir que los elementos, aunque absolutamente puros desde un punto de vista químico, son una mezcla de distintos tipos de átomos, desde luego, con la misma estructura pero de masa diferente. Estos átomos, químicamente equivalentes pero de masa diferente, se conocen como isótopos.

Examinemos la tabla periódica de los elementos. El comportamiento químico de cada uno de ellos está dado, en gran medida, por el lugar que ocupa en la tabla; o sea que los metales alcalinos, de comportamiento similar, ocupan la misma columna vertical, así como los alcalinotérreos, los metales nobles, los metales pesados, los halógenos o los gases nobles. El ordenamiento de los elementos de la tabla periódica se hizo inicialmente tomando como base el peso atómico, pero hoy se ordenan de acuerdo con su número atómico. Si los isótopos de un elemento se separan y se pesan se encuentra que cada isótopo tiene un peso atómico muy cercano a un número entero. Por lo tanto la parte fraccionaria del peso atómico de un elemento es el resultado de tomar el promedio de los pesos atómicos de la mezcla natural de isótopos. Como cada isótopo de un elemento tiene un peso atómico próximo a un número entero, parece razonable, como lo propuso Prout, suponer que el átomo de hidrógeno, con peso atómico muy próximo a 1, es la pieza fundamental a partir de la que se construyen todos los demás átomos.

El mismo Hahn cuenta:

El resultado final de mi trabajo fue, por lo tanto, no la preparación de un estado puro, de quizás 9 mg de radio, sino el descubrimiento de un nuevo "radioelemento" que producía la emanación del torio pero que era más fuertemente radiactivo que el torio conocido. Llamé a la sustancia radiorio. ¿Cómo vino a dar esta sustancia a la muestra de radio? La explicación es que la muestra no se extrajo de una veta de uranio puro, sino de una

veta llamada torianita, que existe en Ceilán (hoy Sri-Lanka) y que contiene además de uranio un alto porcentaje de torio. Hablando estrictamente, el descubrimiento del radiotorio fue sólo un asunto de suerte.

LA CONTROVERSIDA

Entusiasmado Otto Hahn, junto con otro joven alemán, Otto Sackur, se enfrentó con un tema entonces muy polémico: ¿cuál era la diferencia entre el actinio reportado por A. L. Debierne (1874-1849) y el emanio de F. O. Giesel (1852-1927?) Los dos jóvenes investigadores demostraron que eran idénticos. En detalle, sucedió lo siguiente.

Debierne, que trabajaba con los Curie, encontró, entre los hidróxidos utilizados en el tratamiento de la pechblenda, un nuevo elemento al que llamó actinio. Su vida media era sólo de unos cuantos segundos.

Simultánea e independientemente Giesel descubrió, al tratar de preparar radio a partir de pechblenda para la Fábrica de Quinina de Brunswick, un elemento también de vida muy corta, al que llamó emanio.

Las propiedades químicas del actinio de Debierne y del emanio de Giesel, tal y como las describieron los dos descubridores, eran diferentes, por lo tanto, parecía que se trataba de elementos distintos. Ramsay consiguió muestras de ambas sustancias y se las entregó a Sackur y a Hahn quienes determinaron con precisión la vida media de cada uno. Resultaron ser ambas de 3.9 s; por lo tanto, el actinio y el emanio tenían que ser el mismo elemento. Se decidió retener el nombre de actinio, ya que el artículo de Debierne precedió el de Giesel. Sin embargo, sabemos que éste entendía mejor las propiedades (muy parecidas a las del lantano, por cierto) de este elemento.

En vista de los éxitos obtenidos, Hahn decidió no corregir el rumbo y dedicarse a la radioquímica. Con el apoyo de Ramsay, que lo estimaba mucho y que estaba convencido de que tales dotes para la investigación se perderían en la industria, consiguió una plaza en el Instituto de Química de la Universidad de Berlín, dirigido por Emil Fischer (1852-1919, premio Nobel de química en 1902). Antes de ocuparla, decidió pasarse unos cuantos meses en Montreal con Ernest Rutherford (187-1937, premio Nobel de química en 1908) para especializarse de lleno en el estudio de las desintegraciones radiactivas.

Desintegración radiactiva

Los elementos radiactivos liberan tres clases de radiaciones: ondas electromagnéticas de alta frecuencia, conocidas como radiaciones (γ), corrientes de electrones de alta velocidad llamadas partículas (β) y fragmentos, constituidos por dos unidades de carga positiva y cuya masa es la de un átomo de helio, llamadas partículas alfa. En teoría, por lo menos, es relativamente fácil separar estos tres tipos de radiaciones cuando son emitidas por una pequeña porción de material que contenga una mezcla de elementos radiactivos. Por ejemplo, si se hace un orificio pequeño en un bloque de plomo (este elemento absorbe radiaciones de todas clases) y si se coloca un poco de material radiactivo en el fondo del orificio, saldrá de la entrada del orificio un haz de radiación muy fino. Si este haz pasa a través de un intenso campo eléctrico formado por un par de placas paralelas el haz se dividirá. Igual sucede si pasa a través de un intenso campo magnético. En efecto como las partículas α son positivas se desvían, como las β son negativas también se desvían pero en sentido inverso, y los rayos γ no se desvían (figura V,1)

EN LA UNIVERSIDAD MCGILL

En septiembre de 1905, a los 26 años, O. Hahn cruzó el Atlántico para incorporarse a la Universidad McGill en Montreal.

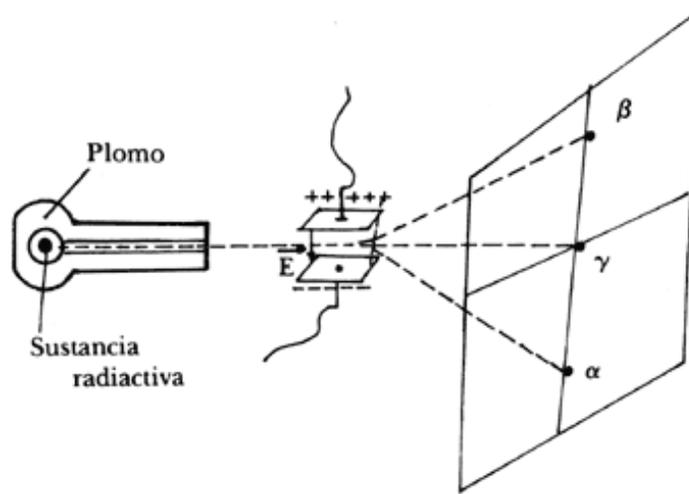


Figura V.1. Los elementos radiactivos liberan tres clases de radiaciones que se pueden separar mediante un campo eléctrico.

¡Cuál no fue su sorpresa al comprobar que se le recibía con cierta reserva! No creían en la veracidad de sus descubrimientos porque B. B. Boltwood (1870-1927), un buen amigo de Rutherford y sobresaliente radioquímico de Yale, había trabajado con el radiotorio descubierto por Hahn y había determinado que: "la substancia viene a ser un nuevo compuesto de ThX y de estupidez". Sin embargo, Hahn supo demostrar que el radiotorio existía y además logró hacerse amigo de todos sus nuevos colegas, incluyendo al mismo Boltwood.

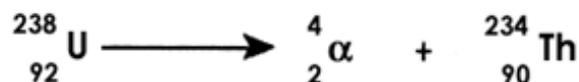
Hahn escribió:

El ambiente en el instituto de Rutherford era de lo más estimulante. Rutherford todavía no se había vuelto mundialmente famoso como para atraer muchos alumnos[...] el único forastero, además de mí, era el doctor Max Levin de Gotinga, y él también estaba estudiando radiactividad. Después fue profesor en Gotinga pero, más adelante, por razones extrañas, tuvo que ocuparse de la fábrica de relojes de su padre.

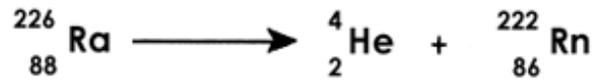
En una ocasión la revista inglesa *Nature* quiso publicar una fotografía de Rutherford, al que le importaba muy poco la apariencia externa. Sin embargo, al público inglés no se le podía presentar un retrato en el cual no se viesen los puños albeantes de la camisa asomando bajo las mangas de la chaqueta. Fue Otto Hahn el que le prestó a Rutherford sus puños postizos (puños que, como el cuello, se ponían y se quitaban a las camisas para poderlos lavar y almidonar por separado) para que el neozelandés posara luciendo impecable. Otto Hahn presumía de que al menos sus puños habían sido inmortalizados por *Nature* en 1906, mismo año en el que el que pasó a formar parte de la Universidad de Berlín, ya "transmutado" de químico orgánico a radioquímico.

LA TRANSMUTACIÓN

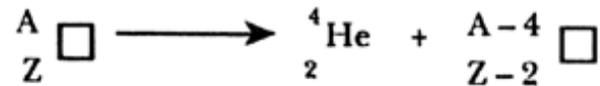
Las transformaciones radiactivas se escriben científicamente como transformaciones químicas, añadiendo las masas y las cargas eléctricas. Así, la transmutación del núcleo de uranio, cuyo número de masa es 238 y cuyo número atómico es 92, a núcleo de torio de número de masa 234 y número atómico 90 se formula:



Se pone de este modo en evidencia, con los índices superiores, la conservación del número de nucleones ($238=234+4$), y con los índices inferiores, la conservación algebraica de las cargas ($92=2+90$). Se conoce como radiactividad a una transformación en la cual el núcleo del átomo pierde solamente una partícula α , por ejemplo:



De manera más general, si un radioelemento de número de masa A y de número atómico Z presenta radiactividad α la reacción nuclear se formula como:



o sea que en la tabla periódica el nuevo elemento se encuentra dos casillas más atrás (figura V.2). La reacción nuclear inversa, es decir la captura de una partícula α por un núcleo, también es posible.

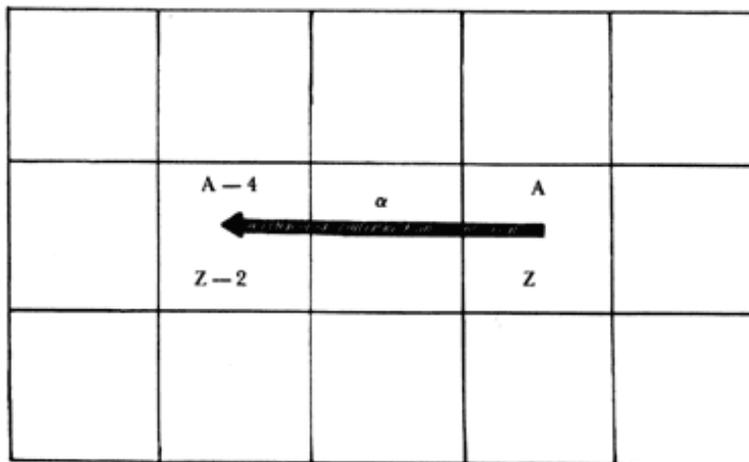
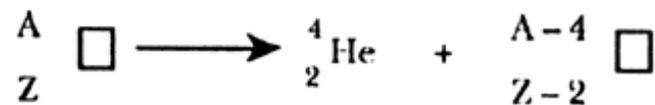
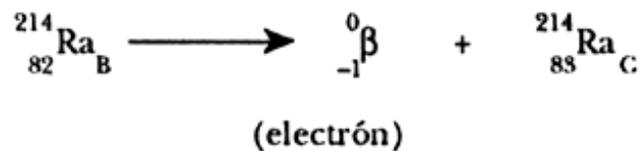


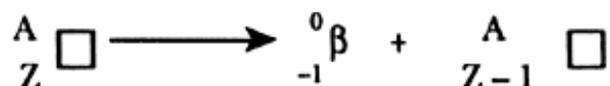
Figura V.2. Resultado de la radiación α , la reacción nuclear se formula como:



Como radiactividad β^- se define a una transformación durante la cual un neutrón del núcleo se divide en un protón que allí permanece y en un electrón que se expulsa. Por ejemplo, un tipo de radio B, se transforma en radio C, que es otro tipo de radio:



O sea en general:



Esta transmutación no cambia el número de masa, pero aumenta el número atómico una unidad. Por lo tanto, hace que el elemento formado haya avanzado un casillero en la tabla

periódica.

Análogamente, la radioactividad β^+ es una transformación en el curso de la cual el protón del núcleo se divide en un neutrón que se queda en el núcleo y un electrón positivo que se expulsa (figuras V.3 y V.4)

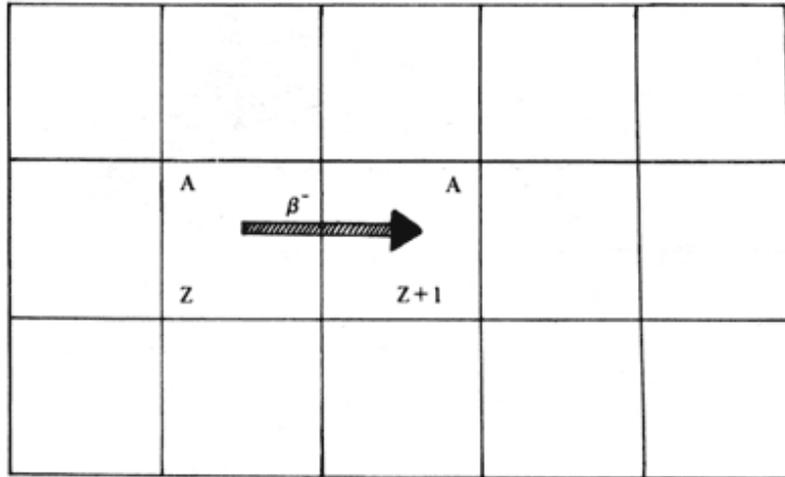


Figura V.3. Resultado de la radioactividad β^- , en general se puede escribir:

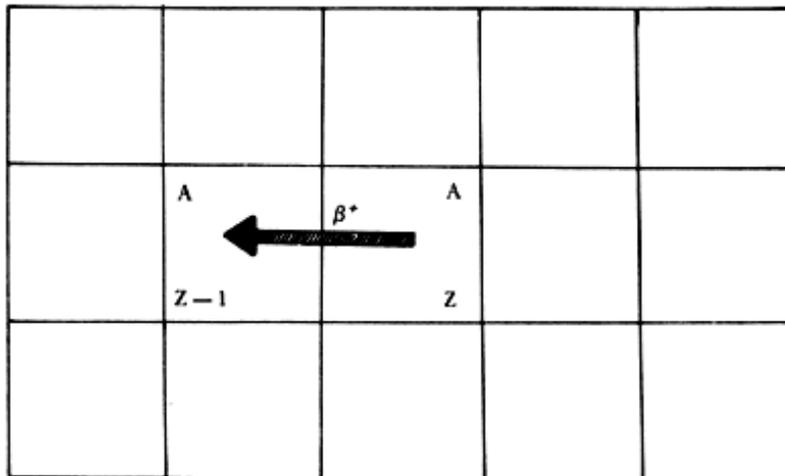
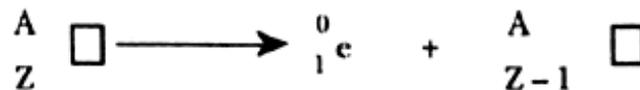
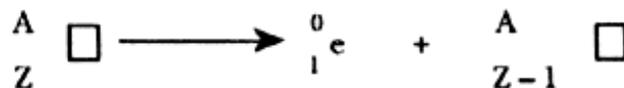


Figura V.4. Resultado de la radioactividad β^+ , en general se puede escribir:



LA ESCUELA ALEMANA

Hahn se incorporó en 1906 al instituto dirigido por Fischer. De recién llegado, para proseguir sus investigaciones, estableció una relación, provechosa para ambas partes, con "Knofler y compañía", que eran los productores de preparaciones de torio. En Canadá, Hahn había encontrado que la vida media del radiotorio era de dos años, pero Boltwood (¡otra vez Boltwood!) argumentaba, con base en sus resultados, que debía ser menor. Hahn probó, estudiando muestras preparadas, varios años antes, que la actividad disminuía al principio y luego aumentaba gradualmente. Es decir, que debía existir un radioelemento entre el torio y el radiotorio. Otto Hahn consiguió

separarlo en 1907 y lo llamó mesotorio. Como químicamente no es fácil separarlo del radio, material escaso en Alemania, y como la demanda de radio crecía, Knofler y Compañía decidieron vender, con mucho éxito por cierto, el mesotorio de gran actividad, al que se conoció como *radio alemán*.

Otto Hahn nos cuenta:

Un día Emil Fischer me mandó llamar para que le procurara información sobre la radiación del mesotorio a un profesor del Charité-Hospital de Berlín que quería usarlo para irradiar cultivos de tubérculos. El viejo *Geheimrat* me recibió amablemente y entonces empezó a describir los experimentos que había llevado a cabo con "semitorio". Cuando repliqué, con toda la modestia debida, que el nombre correcto era mesotorio, me dio una amistosa palmada en la espalda y dijo: "¡Créame joven colega, la sustancia se llama semitorio!" Recordando la mala impresión que causé en el Congreso de Bunsen, esta vez, con recién estrenada modestia, tuve buen cuidado de no corregir su error.

Con la misma modestia recuerda:

Todos mis intentos de separar uno del otro los dos "elementos", radio, y mesotorio, fallaron. Resultaba tan imposible como separar el radiotorio del torio. El parecido químico entre las sustancias era evidentemente mayor que el que hay, por ejemplo, entre las tierras raras; nadie aún había pensado, sin embargo, en la posible existencia de los isótopos.

Al año de su regreso a Alemania, Otto Hahn ya era *privatdozent* (profesor auxiliar) y en 1910 profesor. Muy pronto se hizo amigo de sus colegas físicos, entre ellos Walther Nernst (1864-1941) y de compañeros más jóvenes como Max von Laue (1879-1960), Adolf von Baeyer (1835-1917), Gustav Hertz (1887-1975) y James Franck (1882-1964), todos ellos premios Nobel entre 1905 y 1925.

Esto no quiere decir que aun en un medio tan privilegiado intelectualmente no existiesen los "valores establecidos". Por ejemplo en 1907, durante un congreso, su amigo Max Levin tuvo que sugerirle a Otto Hahn que fuese más prudente en algunas de sus intervenciones, pues acababa de oír a un profesor de la vieja guardia decirle a otro: "Oh, es uno de esos berlineses britanizados", refiriéndose a Hahn. Fue a partir de este incidente cuando Hahn decidió "volverse modesto", tal y como lo probó en su entrevista con el *Geheimrat* que referimos arriba. Hasta Emil Fischer era uno de los que difícilmente aceptaban que se pudiese detectar, por métodos radiactivos y por sus propiedades químicas, cantidades muy por debajo de lo que se puede pesar. En la conferencia inaugural del curso dictado por Otto Hahn en 1907, Fischer declaró que para ciertas sustancias la prueba más fina era la del olfato, y difícilmente se encontraría otra más sensible. Esta actitud conservadora y tradicionalista fue característica de los químicos, mientras que los físicos se mostraron más avanzados, entre ellos la austriaca Lise Meitner (1878-1968).

A Berlín llegó de Viena Lise Meitner en el otoño de 1907 para efectuar un trabajo teórico bajo la dirección de Max Planck (1858-1947, premio Nobel de física en 1918) y para llevar a cabo algunos estudios experimentales sobre la radiactividad. Así empezó una colaboración fructífera entre Hahn y Meitner, que tenían la misma edad. Trabajaron bajo el mismo techo durante 31 años. Su colaboración se vio interrumpida porque Meitner tuvo que escapar de Alemania, huyendo de la persecución política y racial. Pero volvamos al año 1907, Hahn nos cuenta:

En aquellos días no se permitía a las mujeres trabajar en el Instituto Fischer. Cuando le planteé la colaboración a Emil Fischer, le otorgó un permiso a la señorita Meitner para que trabajase conmigo en la carpintería de la planta baja del instituto (Otto Hahn se refiere, aquí, al local en donde estaba instalado su laboratorio, y que había sido una carpintería), en donde se llevaban a cabo las medidas de radiactividad: le solicitó, sin embargo, que no entrase a los cuartos de estudio del piso superior ya que sentaría un mal precedente.

También por aquellos días Hahn disponía, en su laboratorio, de una colección casi completa de radioelementos. Él y Lise Meitner decidieron observar las radiaciones beta, es decir, los electrones emitidos por los materiales radiactivos. Comprobaron que varios elementos, al contrario de lo que se creía, eran emisores de radiaciones beta cuando decaían.

EN LA SOCIEDAD KAISER WILHELM

Cuando el nuevo Instituto de Química (Institut für Chemie) de la Sociedad Kaiser Wilhelm abrió sus puertas en Berlín-Dahlem a finales de 1912, a Hahn lo nombraron jefe de un departamento de radiación pequeño pero independiente, del cual, desde luego Meitner formaba parte. Como este laboratorio era nuevo, no estaba contaminado, lo cual les permitió estudiar sustancias de radiactividad tan débil como el rubidio y el potasio. Se interesaron entonces en fechar rocas gracias a dichos elementos. Con los años este laboratorio se dividió en dos grandes departamentos, uno abocado a la radioquímica, dirigido por Hahn, y el otro a la física nuclear, dirigido por Meitner. Recuerda Otto Hahn:

Después de mudarnos de nuestro territorio contaminado del Instituto de Química al recién levantado Instituto de Química de la Sociedad Kaiser Wilhelm (1913). pudimos hacer trabajo experimental con los elementos débilmente activos, potasio y rubidio. Muchos años después estas investigaciones llevaron a lo que se llamo "método del estroncio" para determinar la edad geológica.

Método de estroncio

Los elementos radiactivos naturales son, sobre todo, isótopos de los elementos con número atómico mayor de 80, es decir, que en la tabla periódica se encuentran más allá del mercurio (Hg). Estos elementos radiactivos se prestan a numerosos métodos de fechado (o medida de antigüedad) de muestras geológicas o arqueológicas. En un sistema aislado, la ley según la cual decrece el número total de átomos del padre (N) y aumenta el número de átomos del hijo (D) está dada por: $N_0 = N + D$, en donde N_0 es el número inicial de átomos del padre. Además, se sabe que como el padre decae el número de átomos del padre es función del tiempo (t):

$$\ln N = -\lambda t + \ln N_0.$$

$$\text{o sea } N = N_0 e^{-\lambda t} \text{ en donde } \lambda = \ln 2 / t_{1/2}$$

No se debe confundir t , que es el tiempo que se desea determinar, y $t_{1/2}$ que es la vida media del elemento inicial. Así, el tiempo transcurrido desde el origen del sistema es:

$$t = (1 / \lambda) \ln (1 + D / N) \text{ porque } N = (N_0 - D) e^{-\lambda t}$$

Por lo tanto t se puede deducir a partir de λ y de la abundancia relativa del átomo padre y del átomo hijo.

La desintegración del ^{87}Rb en ^{87}Sr es la filiación más importante en la medida de muestras geológicas. El rubidio natural (Rb) es una mezcla de los isótopos ^{85}Rb (72.15%) y ^{87}Rb (27.85%). El contenido de estroncio, "común y corriente" en el ^{87}Sr (no radiactivo) es de 7.02%.

El periodo (o sea λ) del ^{87}Rb , que es de 4.7×10^{10} , años nos permite hacer las siguientes aproximaciones:

$$N \sim N_0 (1 - \lambda t)$$

$$D = N_0 - N = N_0 \lambda t$$

$$t = (N_0 - N) / \lambda N_0 \sim D / \lambda N_0$$

que es una ecuación sencilla, pero que necesita de una determinación muy precisa del contenido de estroncio ^{87}Sr no radiactivo en la muestra. Este método es efectivo en el caso de las micas, por ejemplo. En general el estroncio se extrae por vía química y el contenido de Sr se determina por espectrometría de masas.

TIEMPOS AMARGOS

Éstos fueron también los años en los que se hicieron los avances más importantes en la teoría de la radioquímica. Fajans y Soddy, independientemente, concluyeron en 1913 que cada grupo de especies inseparables (como el radiotorio y el torio) correspondían a un solo elemento químico, o sea que se debían clasificar en el mismo sitio de la tabla periódica. Por eso Soddy propuso designar a las especies de un grupo como isótopos, del griego *iso*, mismo, igual, y *topos*, lugar. Es decir, que en cada casilla de la tabla periódica se debe incluir a todos los átomos que tengan el mismo número de protones (número atómico) aunque su masa sea diferente (o sea, aunque tengan diferente número de neutrones), tal y como lo explicamos anteriormente.

Como otros radioquímicos, Hahn ya estaba familiarizado con hechos como la imposibilidad de separar el mesotorio del radio o el radiotorio del torio. Pero las generalizaciones necesarias para explicar estos rompecabezas no eran su fuerte. Hahn era, ante todo, un excelente experimentador.

Sintiendo que su vida ya estaba encarrilada, Hahn se casó con Edith Junghans en 1913, más la fatalidad quiso que, un año después, estallara la primera Guerra Mundial y que tuviese que incorporarse a un regimiento. En 1915, a los treinta y seis años con grado de sargento, participaba activamente en la guerra química, bajo la dirección científica de Fritz Haber (1868 - 1934 premio Nobel de química en 1918). Así, se vio envuelto en el desarrollo, prueba, manufactura y uso de nuevas armas, y vivió el conflicto en el frente occidental durante el otoño de 1914. Cuando se encontraba en Bruselas en enero de 1915 se le ordenó que llamara a Fritz Haber, que entonces se encontraba también en Bélgica cumpliendo con una misión para el Ministerio de la Guerra.

Haber le explicó que la guerra se había visto paralizada en las trincheras y que hacían falta nuevas armas para romper el estancamiento. Anteriormente se habían probado irritantes químicos con el propósito de hacer inhabitables las trincheras. Sin embargo Walter Nernst había tenido poco éxito y el propio Haber dio por terminado el trabajo en diciembre de 1915 cuando una explosión en su laboratorio mató a Otto Sackur. Cuando Hahn visitó a Haber un mes después, ya no se trataba de sacar al enemigo de las trincheras sino de matarlo, y por eso se investigaban las posibilidades bélicas del cloro.

A Hahn, ahora teniente, y a algunos de sus colegas (James Franck, Gustav Hertz, Wilhelm Westphal y Erwin Madelung) los concentró el ejército en una nueva unidad: el Regimiento 36 donde se les entrenó en los usos de los gases venenosos, la defensa contra ellos y la meteorología. En un par de meses ya estaba Hahn de regreso en Flandes como miembro de un regimiento de infantería: era el experto en gases. Una vez instalados los cilindros de gas a lo largo del frente, se planeó el ataque en repetidas ocasiones. Había que programarlo con 24 horas de adelanto para poder trasladar las unidades de la retaguardia hasta el frente pero, en todas las ocasiones, condiciones climáticas adversas, obligaron a cancelar la operación. El Alto Mando decidió entonces mover los cilindros a Yprès, Bélgica donde los vientos solían ser favorables. En abril de 1915 se liberó el gas de 5 000 cilindros distribuidos en un frente de más de 6 km y se formó una nube de 640 a 915 m de espesor que fue a dar a las líneas francesas afectándolas gravemente. Casi una división se asfixió, más de 15 000 hombres resultaron afectados y un tercio de ellos murió. Este suceso se suele considerar como el inicio de las guerras químicas "científicamente" organizadas.

Ni la guerra química, ni ningún tipo de destrucción iban con el carácter de Hahn, tan preocupado por los problemas morales. En su autobiografía escribió:

Como resultado de trabajar con sustancias tan tóxicas nuestras mentes se nublaron tanto que perdimos todo escrúpulo. En cualquier forma, para entonces nuestros enemigos habían copiado nuestros métodos y, como se perfeccionaron rápidamente en este tipo de guerra, nos convertimos paulatinamente en receptores del ataque y fuimos dejando de ser los agresores. Otro factor que se debe considerar es que nosotros, como observadores del frente, pocas veces vimos los efectos directos de nuestras armas. En general, todo lo que sabíamos era que el enemigo había abandonado las posiciones que se habían bombardeado con granadas de gas.

En ambos lados del frente hubo combatientes a quienes participar en la guerra con armas de gas no les provocó sentimientos de culpa. Se invocó la necesidad de defenderse, y la reacción de los aliados fue brutal. Cierta

instalación de desarrollo e investigación situada cerca de Washington, por ejemplo, sólo contaba con dos edificios cuando EUA entró en la guerra mas, para la fecha del Armisticio, había 50 edificios y trabajaban allí 1 200 científicos. Un grupo de investigación dirigido por James Bryant Conant elaboró un proceso para producir gas mostaza (mucho más mortífero que el de los alemanes) cuando un grupo británico, encabezado por William Pape, acababa de lograr lo mismo. Pero, volvamos a Hahn y a la primera Guerra Mundial.

De esa época. Otto Hahn relata esta anécdota:

Durante la primera Guerra Mundial mi coronel me presentó a un oficial superior con las palabras: "En la vida civil el teniente Hahn es profesor y descubrió el mesotorio." El oficial contestó: "Entiendo que el teniente Hahn es químico: ¿pero qué tiene que hacer con animales antediluvianos?"

A pesar de tanta actividad, antes del armisticio Hahn tuvo la oportunidad de visitar su laboratorio en Berlín-Dahlem. Con Meitner, en 1917, descubrió el isótopo más estable del elemento 91, que llamaron protactinio (Fajans y Gohring, en 1913, habían descubierto este elemento, el 91, y lo habían bautizado *brevium* debido a su muy corta vida).

Como ya casi todos los elementos naturales habían sido descubiertos, los temas de investigación básica en radioquímica eran muy limitados. Hahn se dedicó durante los doce años siguientes a estudiar las aplicaciones de la radiactividad a los problemas químicos hasta que la radioquímica resurgió para transformarse en química nuclear con el gran acontecimiento de 1932: James Chadwick (1891-1974, premio Nobel de física en 1935) descubrió el neutrón. Solo dos años después, en 1934, Irène Curie (1897-1956) y Frédéric Joliot (1900-1958) (premios Nobel de física en 1935), pusieron en evidencia los tres primeros radioisótopos artificiales y un nuevo mecanismo de desintegración beta por emisión de electrones positivos, llamados positrones y definidos como partículas elementales de carga positiva y de la misma masa que el electrón negativo. ¡Es decir que los Joliot-Curie habían descubierto la radiactividad artificial! Es sorprendente que nadie pensara que el resultado de una desintegración nuclear debería ser un núcleo inestable, aunque durante 30 años se estuviese familiarizado con los núcleos inestables.

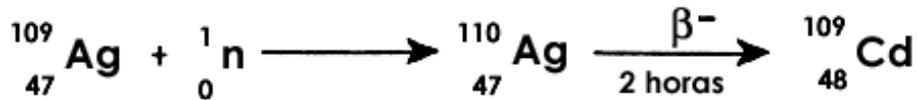
Otto Frisch, de quien hablaremos en detalle más adelante, comentó:

Después del descubrimiento hubo una especie de estampida de borregos para repetir el experimento con las más obvias variaciones (yo fui uno de los borregos). Sólo Fermi tuvo la inteligencia de lanzarse en una dirección muy diferente y extremadamente fructífera. Sólo Fermi tuvo la inteligencia de lanzarse en una dirección muy diferente y extremadamente fructífera.

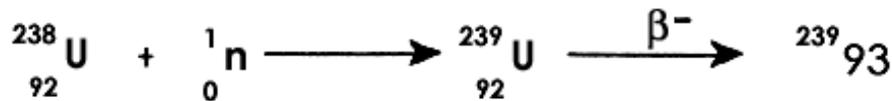
Para ello, Fermi disponía del instrumental adecuado. Al enterarse del descubrimiento de los Joliot-Curie, propuso un experimento para comprobar si con neutrones, se formaban núcleos radiactivos. La mayor parte de los investigadores encontraron que semejante experimento no tenía futuro, ya que se disponía de mucho menos neutrones que de partículas alfa (las partículas alfa no son más que núcleos de helio). Pero no se dieron cuenta de que a los neutrones como no tienen carga, no los frenan los electrones y no los repele el campo de Coulomb del núcleo, esto es, son más eficaces que las partículas alfa. Es más: el neutrón, al acercarse al núcleo, queda sujeto a las intensísimas fuerzas que existen entre los protones y los neutrones del núcleo.

Cuatro semanas después del descubrimiento de los Joliot-Curie, Fermi publicó los primeros resultados que probaban que varios elementos se vuelven radiactivos cuando se les bombardea con neutrones. Un mes más tarde ya anunciaba que el bombardeo del uranio producía una nueva radiactividad que parecía deberse a elementos transuránicos, o sea elementos con más de 92 protones y, por lo tanto, situados más allá del uranio en la tabla periódica.

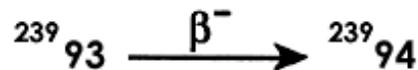
Enrico Fermi y sus colaboradores intentaban, al irradiar el elemento más pesado presente en la naturaleza (el uranio, cuyo número atómico, Z , es 92), obtener un elemento con número atómico 93, o sea, el primer elemento transuránico. A diferencia de las partículas α que se habían usado anteriormente para inducir transformaciones nucleares, los neutrones, partículas sin carga, se unen fácilmente a los núcleos atómicos, aun en el caso de los elementos pesados. Así, en esta última posibilidad se obtienen isótopos del elemento inicial, que sufre un decaimiento β^- . En el decaimiento β^- el isótopo emite un electrón y se transforma en el elemento con el siguiente número atómico. Por ejemplo, el isótopo estable de la plata $^{109}_{47}\text{Ag}$ captura, un neutrón para formar plata $^{110}_{47}\text{Ag}$ que decae por emisión β^- (vida media de 2 horas) en cadmio estable $^{109}_{48}\text{Cd}$:



Si el mismo tipo de reacción se produjera en el uranio, se esperaría formar el elemento 93:



Este elemento tendría que haber sido radiactivo y, nuevamente por emisión β^- , debería haber dado lugar al elemento 94:



Este razonamiento parece lógico, tanto así que Fermi y sus colaboradores en su laboratorio de Roma encontraron al menos cinco emisores β^- con vidas medias de 10s, 40s, 13m y un día, después de irradiar uranio con neutrones.

En esta época, el uranio, debido a su más alto estado de oxidación (+6) se colocaba en el grupo de los elementos de transición, es decir, debajo del cromo. Por lo tanto, para los elementos más allá del uranio, se esperaban propiedades similares Re, Os, e Ir. Estos elementos se denominaban según homólogos: Eka-Re, Eka-Os, Eka-Ir, etcétera.

Sin embargo la detección de emisiones β^- no es una prueba suficiente. La formación de nuevos elementos se debe probar de un modo más directo o sea, por métodos químicos. Había que demostrar que las actividades químicas de los compuestos transuránicos eran las esperadas dada su localización en la tabla periódica. Estas identificaciones son muy difíciles porque las emisiones β^- se producen en cantidades ínfimas, que no son ni visibles ni pesables. La única manera de hacerlo es por la radiactividad, que permite la detección incluso de átomos aislados. Es fácil entender las reservas de Fermi cuando concluyó que había encontrado elementos más pesados que el uranio. Esta conclusión, de inmediato, provocó grandes polémicas en Alemania: entre otros Von Grosse y Agruss asignaban la actividad detectada por Fermi al elemento 91, el protactinio.

Hahn y a Meitner en el camino de la fama. Ambos se sintieron desafiados ya que consideraban al protactinio su coto privado; fueron ellos, en efecto, los que nombraron al elemento y los que encontraron al único isótopo natural de protactinio que existe en cantidades pesables: el protactinio - 231 (3.3×10^4 años). Aún más, Hahn había descubierto con protactinio-234 el fenómeno del isomerismo nuclear, o sea la existencia de dos núcleos con el mismo número de protones y de neutrones pero con diferentes vidas medias: 1.17 m para el metaestable (m) y 6.75 horas para el estado base (g). Fue Lise Meitner quien se interesó de inmediato en las reacciones nucleares de Fermi y quien convenció a O. Hahn de reiniciar la colaboración interrumpida hacía 12 años. La idea era centrarse en los elementos transuránicos. En una primera nota sus observaciones estaban de acuerdo con la interpretación de Fermi, pero había que investigar qué eran todos esos "nuevos elementos", interpretar tantos resultados sorprendentes y entender el mecanismo por el cual se formaban.

Era la época en la que Leo Szilard bromeaba diciendo que si un hombre, de repente, hacía algo inesperado había una mujer detrás de él, pero que si un núcleo atómico hacía algo inesperado seguramente había un neutrón detrás de él. Lise Meitner escribió:

Encontré que estos experimentos eran tan fascinantes que en cuanto aparecieron en *Nuovo Cimento* y en *Nature* convencí a Otto Hahn de colaborar directamente conmigo otra vez [...] para resolver estos problemas. Me pareció muy sorprendente que el uranio diera lugar a una cadena tan larga de emisores β consecutivos.

Se trataba, pues, de un problema de física nuclear, así que ahora era Lise Meitner quien definía el problema y dirigía al grupo de Berlín. Sin embargo, la ayuda de Hahn era fundamental. La Meitner le confesó a Max von Laue "que no se llegaría a ningún sitio en este campo sólo con la física. Hacía falta la ayuda de un químico del calibre de Otto para tener éxito". Una vez más se comprueban las características de la ciencia moderna: el trabajo en equipo y la interdisciplinariedad. Sin embargo todo este trabajo se veía muy entorpecido por la situación política de Alemania. Hitler tomó el poder en 1933 y el Partido Nazi se convirtió en el único autorizado. Los primeros campos de concentración aparecieron en 1933.

LA HUIDA

En unos cuantos meses las universidades alemanas perdieron al 25% de sus físicos debido a las políticas raciales de Hitler. Entre ellos Einstein, Franck, Born, Otto Stern y muchos profesores jóvenes quienes aún no eran tan conocidos. Aunque Lise Meitner no escondía sus raíces judías, no fue despedida. Su primer impulso fue renunciar a su plaza pero sus amigos la convencieron de no hacerlo. Después lo vio claramente: "quedarse hubiese tenido el efecto de apoyar a Hitler."

En 1933 era difícil adivinar el futuro, así que permaneció en Berlín. Allí disponía de todo lo necesario para trabajar y mal que bien el instituto consiguió barajar sus cartas políticas con mucha cautela para esquivar las persecuciones raciales y políticas.

A mediados de 1935, el dúo Hahn-Meitner le pidió al joven Fritz Strassman, un experto químico analítico, que colaborara con ellos. Se formó así un equipo armonioso tanto desde el punto de vista científico (químico, físico, químico analítico) como político: Meitner, "no aria", Hahn, conocido por sus puntos de vista antinazi y Strassmann, el valiente joven que se negó a unirse al Partido Nazi o a cualquier organización afín, y que por lo tanto tenía todas las puertas cerradas fuera del Instituto.

No fue sino en marzo de 1938 (cuando se produjo la anexión de Austria por los nazis) que empezaron a propagarse rumores de que Lise Meitner (judía austriaca) podría perder su plaza y de que se le impediría salir de Alemania para proteger los secretos científicos. El 13 de julio de 1938, Meitner se escapó literalmente "de contrabando" con la ropa que traía puesta y unas cuantas monedas en el bolsillo. Logró llegar a Holanda gracias a sus amigos Dirk Coster y Adrian Fokker. Iba sin pasaporte ni papeles pero logró pasar después a Dinamarca y luego a Suecia, en donde Manne Siegbahn la acogió en el Instituto Nobel de Estocolmo.

HAHN Y STRASSMAN DESUBRIDORES

En Francia, Irène Curie y su colaborador yugoslavo Pável Savitch lograron aislar, después de bombardear al uranio con neutrones, una sola sustancia cuya vida media era de 3.5 horas. Lo consiguieron cubriendo sus muestras con una capa gruesa de bronce. Esta sustancia, por su comportamiento químico, parecía ser torio.

Hahn revisó el trabajo y concluyó que no era torio. Así se lo comunicó a los franceses, que en un artículo del verano de 1938 reconocieron que, en efecto, la problemática sustancia no se comportaba como el actinio, añadiendo que se parecía mucho al lantano. Curie y Savitch escribieron textualmente "Se puede separar por fraccionamiento."

¡Qué cerca estaban de la fisión nuclear! El mismo Hahn nos dice:

de hecho su sustancia era sin lugar a dudas el mismo lantano. Si la señora Joliot-Curie y Savitch lo hubiesen reconocido, hubiesen estado a punto de descubrir la fisión.

Nuevamente Hahn, esta vez con Fritz Strassmann y ya sin Meitner, puso manos a la obra y repitió este trabajo. Hahn y Strassmann descubrieron productos radiactivos que se comportaban en parte como el actinio, en parte como el radio. Determinaron cuidadosamente las propiedades de este "radio" y se dieron cuenta de que eran idénticas a las del bario. Hahn explica: "En breve, nuestro 'radio' artificial no se podía separar del bario ¡por la sencilla razón de que era bario!" Otto Frisch cuenta:

Fue entonces cuando yo aparezo, porque L. Meitner se sentía sola en Suecia y, como sobrino devoto, fui a visitarla en Navidad. Allí, en un pequeño hotel, en Kungälv, cerca de Goteborg, la encontré desayunando y meditando sobre una carta de Hahn. Me mostré escéptico sobre el contenido —que el bario se formaba por bombardeo del uranio con neutrones— pero ella siguió dándole vueltas. Caminamos en la nieve, yo con esquís, ella a pie[...] y gradualmente la idea fue tomando forma[. ..] era un proceso que se debía explicar en términos de la idea de Bohr, o sea que el núcleo era como una gota líquida; semejante gota puede elongarse y dividirse. Pensé en la manera como la carga eléctrica del núcleo hubiese disminuido la tensión superficial y vi que sería cero para $Z = 100$ y seguramente muy pequeña para el uranio[...]. En el primer artículo utilicé la palabra "fisión", que me sugirió el biólogo norteamericano William A. Arnold, a quien le pregunté cómo se llamaba la división de una célula.

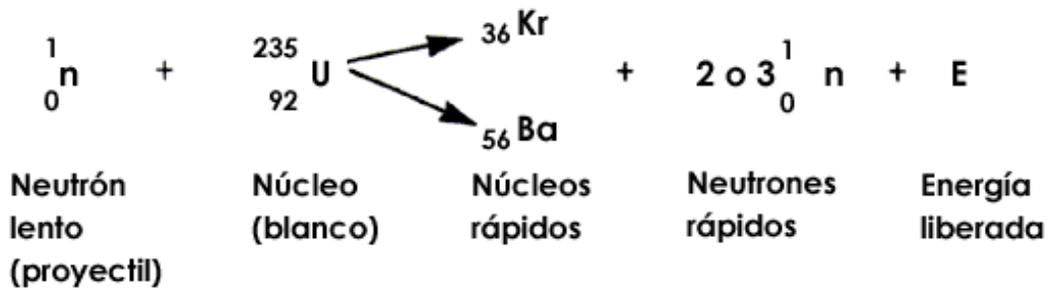
En el primer artículo utilicé la palabra "fisión", que me sugirió el biólogo norteamericano William A. Arnold, a quien le pregunté cómo se llamaba la división de una célula.

[Hahn nos lo cuenta así:]

En enero de 1939 publicamos un resumen de estos experimentos que se separan de todos los experimentos previos en física nuclear. Al interpretar los experimentos fuimos muy cautelosos, en parte porque la serie de pruebas todavía no estaba totalmente terminada —duraron varias semanas. Pero nuestra cautela no se debía a desconfianza en nuestros resultados. En efecto, yo había comprobado nuestra conclusión, ya que habíamos identificado como lantano un producto de decaimiento de uno de nuestros isótopos de radio, lo cual significaba que el padre debía ser radio y no bario. Nuestra excesiva cautela se debía, sobre todo, al hecho de que, como químicos, no nos atrevíamos a anunciar un descubrimiento revolucionario en física. Sin embargo, hablamos de "estallido" del uranio, así llamamos al sorprendente proceso que había producido bario, muy abajo en la tabla periódica[...]. Inmediatamente después de aparecer nuestro artículo, Meitner y su sobrino Otto Frisch, independientemente, salieron con su histórica publicación demostrando cómo el modelo atómico de Niels Bohr podía explicar el rompimiento de un átomo pesado en núcleos de tamaño medio.

El papel de Hahn, en tan trascendental descubrimiento, fue aceptar los hechos experimentales. En función de sus medidas afirmó que obtenía lantano y propuso "el estallido" del núcleo, supo, además, convencer a su entorno (al revés de I. Noddack, como veremos más adelante) mediante argumentos irrefutables que sacudieron los conocimientos de su época. Cuando Otto Frisch regresó a Copenhague le contó a Bohr las conclusiones a que había llegado. Bohr estaba entonces a punto de embarcarse hacia Estados Unidos, más se entusiasmó exclamando: "Pero qué tontos hemos sido. Esto es maravilloso y justo como debe ser." Y lo instó a publicar cuanto antes el resultado. Bohr, en el mismo barco, hizo parte de los cálculos necesarios para probar que era el isótopo 235 del uranio el que se fisionaba al bombardearlo con neutrones lentos.

Esta operación consiste en provocar el estallido del núcleo de un átomo pesado, obteniendo fragmentos de masa mediana. Un isótopo del uranio, el $^{235}\text{U}_{92}$ se presta a este proceso y una de las reacciones que se producen al bombardearlo con neutrones lentos se formula así:



Esta reacción se conoce como fisión; consume un neutrón lento y libera, además de 2 o 3 neutrones rápidos y energía, dos átomos de una masa media (kriptón y bario). Si se consigue disminuir la velocidad de estos neutrones rápidos, estos mismos neutrones son capaces de provocar 2 o 3 nuevas reacciones etcétera.

La energía E se puede calcular para la fisión individual tomando en cuenta las energías cinéticas del neutrón incidente, de los fragmentos Kr y Ba producidos de los neutrones expulsados y de la energía de la radiación γ . También se puede hacer la suma de la energía de cohesión del núcleo inicial de U. La diferencia es entonces igual a E.

La reacción de fisión contemplada aquí libera alrededor de 200 MeV. Esta energía es mucho mayor de la que se obtiene en los procesos de radiactividad natural (10 MeV). ¡Las reacciones químicas usadas, como la combustión del carbón, del hidrógeno, etc., proveen energías de unos cuantos electrón-volts solamente!

Hay que hacer notar, además, que los 200 MeV no representan más que alrededor de 1/1000 de la masa del átomo de uranio que sufre la ruptura.

En las bombas atómicas se deja que el mecanismo se multiplique y se dispone rápidamente de una energía colosal. En las pilas atómicas, al contrario, gracias a dispositivos moderadores, se le impide a la reacción en cadena degenerar en explosión y se controla en todo momento la potencia liberada por el reactor. El fenómeno de la fisión no debe confundirse con el de la fusión.

La fusión

En este proceso se parte de núcleos ligeros y se intenta formar núcleos más pesados y más estables. Como en este campo las diferencias entre las energías de cohesión son relativamente elevadas, se puede esperar obtener, por unidad de masa de combustible empleado, una energía mucho mayor que para la fisión de elementos pesados.

Es lo que confirmó la bomba H, cuyo proceso se inició con una bomba atómica común y corriente, cuyo papel era obtener una temperatura extremadamente elevada (millones de grados), necesaria para iniciar la fusión entre los isótopos de hidrógeno. En un futuro más o menos próximo veremos, sin lugar a dudas, la fusión controlada, que es la más formidable fuente de energía utilizable que se pueda concebir hoy en día. Nótese que la clave para que estas reacciones sean útiles se encuentra en que sean en cadena.

EL OTRO BANDO

No se debe dejar de mencionar aquí que, cuando Fermi estaba seguro de que el uranio, como otros núcleos pesados, se "tragaría" cualquier neutrón lento que se le acercara, Ida Noddack, una química alemana, apuntaba muy acertadamente que podían formarse elementos ligeros. Sin embargo Ida Noddack no propuso cómo se podrían formar dichos elementos ligeros y sus comentarios (publicados en una revista poco leída por los químicos y sencillamente no leída por los físicos) se tildaron de pedantería pura. Su artículo no tuvo ninguna trascendencia en el trabajo que vino después, como lo hemos visto en los párrafos anteriores. Ida Noddack dijo textualmente:

Es concebible que durante la irradiación de núcleos pesados con neutrones, estos núcleos se desintegren en fragmentos mayores que sean isótopos de elementos conocidos pero no necesariamente vecinos de los elementos originalmente irradiados.

A menudo esta frase se interpreta como la predicción de la fisión nuclear. Sin embargo, hay que insistir en que ni siquiera la Noddack consideró que su proposición fuera digna de probarse experimentalmente.

Strassmann dijo que había sido una coincidencia. Este menosprecio, sin duda, está influenciado por el dudoso e irreproducible descubrimiento del elemento natural 43 anunciado por Noddack. Cuando en cierta ocasión Ida Noddack se quejó de esta actitud: en una nota, Hahn y Strassmann prefirieron en el último momento no publicar una respuesta muy dura que ya habían redactado y le dejaron la ingrata misión a los editores de la revista. La relación entre el matrimonio Noddack y el dúo Hahn-Meitner fue muy tirante, ya que a las controversias científicas se sumaban las políticas.

Y aquí nos vemos obligados a hacer un paréntesis ya relatar lo que sucedía fuera de Berlín.

EN PARÍS

Aunque el grupo de Hahn consiguió mantenerse al margen del esfuerzo de guerra alemán, hubo otros grupos científicos pertenecientes a la escuela alemana que, colaborando con los aliados o con el eje, influyeron en el curso de la guerra. En Hamburgo, Paul Harteck, que había sido alumno de Rutherford, alertó al Ministerio de Guerra: "Nos tomamos la libertad de llamar su atención sobre el progreso más reciente en física nuclear. En nuestra opinión, permitirá tal vez producir un explosivo muchas veces más potente que cualquiera de los convencionales[. ..] La nación que se anticipe en su empleo tendrá una ventaja insalvable sobre las demás." ¿Palabras proféticas? Hoy sabemos que sí lo fueron y sin embargo los alemanes no consiguieron fabricar la bomba atómica. Una explicación de su fracaso, muy discutida al final de la guerra, radica en la reticencia de los físicos alemanes para fabricar una bomba en provecho de Hitler. En sus recuerdos, escritos después del conflicto, W. Heisenberg (1901-1976), el famoso teórico alemán, da la impresión de que tanto él como sus colegas no colaboraron en el proyecto con la diligencia de que eran capaces porque desaprobaban la idea de una bomba en manos del *Führer*.

Sin embargo, la documentación confiscada a los alemanes después de la victoria demuestra que, al menos hasta

1942, los físicos alemanes se entregaron en cuerpo y alma al estudio del uranio. Quizás el motivo por el cual estos trabajos no desembocaron en el arma de la victoria fue la rivalidad entre físicos e ingenieros. En efecto, según los físicos, los ingenieros eran hombres prácticos y por lo mismo obtusos y sin imaginación. Los físicos, en cambio, se consideraban (¡y se consideran!) a sí mismos brillantes, ingeniosos, imaginativos, inventores [...] por lo tanto, sólo ellos debían construir los reactores imprescindibles para obtener el material atómico necesario para la bomba. El resultado fue que la guerra concluyó sin que Alemania tuviera un reactor operativo.

Y en cuanto a los reactores[...] hay que mencionar lo que sucedió en Francia: Joliot fue sometido a un interrogatorio para saber en dónde se encontraba el uranio y su agua pesada. Joliot "confesó" que el uranio había "sido evacuado" y el agua pesada embarcada en Burdeos, y les dio el nombre de un barco que había sido echado a pique.

Los alemanes se interesaron también en el ciclotrón —casi terminado— construido en los sótanos del Colegio de Francia, ya que no había ninguno en Alemania, y aunque W. Bothe (1891-1957) tratase de construir uno en su laboratorio de Heidelberg, pasarían años antes de que lo terminase. Los oficiales de la *Wehrmacht* decidieron adueñarse de la máquina de Joliot como botín de guerra y mandarla a Alemania.

En la primera conversación entre los alemanes y Joliot el intérprete resultó ser Wolfgang Gentner ¡El mismo joven que, siendo estudiante unos años antes en el laboratorio de Joliot, había revisado el contador Geiger cuando, por primera vez, Joliot detectó la radiactividad artificial! Según Gentner el reencuentro fue difícil para ambos. Sin embargo, Gentner consiguió entrevistarse en secreto, en uno de los cafés del Barrio Latino, con su antiguo profesor y pudo advertirle que el ciclotrón francés corría el riesgo de ir a parar a Alemania. Por lo tanto más valía, le sugirió Gentner, que se le propusiera a los invasores usarlo en la propia Francia. Joliot, con estos datos, supo conseguirlo.

En esa época, la política alemana consistía en tratar con cautela y respeto a los franceses eminentes con la esperanza, bien fundada por cierto, de que muchos colaborarían a la integración de su país en una Europa nazi. P. Laval, por ejemplo, quién dirigió el régimen de Vichy presidido por Petain en agosto de 1940, se lamentaba de que el agua pesada hubiese sido enviada a Gran Bretaña. Así que a finales de 1940 cuatro especialistas alemanes empezaron a trabajar en el ciclotrón dirigidos por Gentner. Este grupo tardó mucho en hacer funcionar el ciclotrón, en parte por la dificultad de conseguir las refacciones electrónicas y en parte también porque tuvieron que modificarlo. De hecho, Gentner y sus colaboradores no querían trabajar para la guerra porque simpatizaban menos con sus compatriotas nazis que con sus anfitriones franceses. En más de una ocasión, como lo cuenta Joliot, avisaron a algunos de sus amigos franceses que la Gestapo los vigilaba.

Cuando Bothe aparecía en París, por una curiosa mala suerte, el ciclotrón no funcionaba. Era el jefe de talleres de Joliot el que de cuando en cuando cortaba el agua que servía para enfriar el aparato. Bothe entonces tenía que disculparse por "haber sobrecalentado" la máquina ¡Así, gracias a que un alemán (Gentner) supo separar los principios humanitarios del mundo de los intereses temporales de su propio país, los alemanes no consiguieron el ciclotrón!

LA BOMBA Y LA MASA CRÍTICA

El uranio belga y el agua pesada francesa proporcionaban a los aliados los ingredientes necesarios para la reacción en cadena. Pero recordemos que el uranio existe en la corteza terrestre en tres formas o isótopos. Dos son importantes, el ^{238}U y el ^{235}U , el fisionable es el ^{235}U , pero aparece sólo en cantidades ínfimas, menos del 1% en el uranio tal y como se encuentra en la naturaleza. Nadie, en aquel entonces, tenía noción de cuánto ^{235}U se requería para conseguir la "masa crítica". En aquella época se calculó que la carga imprescindible rayaba en 40 toneladas, o sea que el peso total de una bomba atómica sería demasiado grande para que la transportara un avión.

Fueron dos investigadores, alemán y el otro austríaco, refugiados en Gran Bretaña, Rudolph Peierls y Otto Frisch (otra vez el sobrino de L. Meitner) los que en un informe de sólo tres páginas propusieron que, en vez de intentar aumentar la cantidad de ^{235}U era preferible extraer ^{235}U del ^{238}U . Las dos sustancias son químicamente similares y difieren sólo en el peso, digamos que como la nata y la leche. Los dos alemanes calcularon que 5 kg de ^{235}U , al fisionarse, liberarían una energía igual a la de varios millones de toneladas de dinamita.

Este *Memorandum de Frisch-Peierls*, transmitido por los británicos a los estadounidenses, se convirtió en la base del proyecto Manhattan, cuyas consecuencias todos conocemos.

HAHN CONSAGRADO

Aunque en Alemania se formó un grupo que debía estudiar los desarrollos militares, como lo discutimos antes, para tranquilidad de Hahn se le permitió seguir con su propia investigación. En efecto, Hahn no se interesó en la enorme liberación de energía que caracteriza a la fisión nuclear, en cambio le dedicó todo su empeño al estudio de los fragmentos obtenidos en el proceso. Por lo tanto, no participó en el proyecto del reactor y de la bomba atómica alemanes.

Al terminar la guerra, así como a otros científicos alemanes, se le obligó a instalarse en Inglaterra. Aunque ya tenía sesenta y seis años, todavía era un hombre vigoroso; había sido alpinista y ahora corría todos los días. Fue en la Gran Bretaña en donde se enteró de la explosión de las bombas atómicas en Hiroshima y Nagasaki. Es fácil entender su angustia, apenas compensada por el premio Nobel de química que se le otorgó en 1945.

Cuando pudo, al fin, volver a Alemania a principios de 1946, lo eligieron presidente de la antigua Sociedad Kaiser Wilhelm, rebautizada por sugerencia de las potencias de ocupación como Sociedad Max Planck para el avance de la ciencia. Otto Hahn se convirtió en una figura pública muy respetada era amigo de Theodor Heus (1884-1963, primer presidente de la RFA) y militó enérgicamente en contra del desarrollo y de las pruebas de las armas nucleares. Entre otros, firmó la Declaración de Mainau (1955) de los laureados Nobel, resaltando el peligro del mal uso de la energía atómica. Figuró entre los dieciocho científicos alemanes eminentes que protestaron públicamente contra la adquisición de armas nucleares por Alemania en 1957.

Simultáneamente se le honraba en todas partes. En 1966, por ejemplo, Meitner; Strassmann y él compartieron el prestigioso premio Enrico Fermi. Este periodo de su vida se vio oscurecido por la pérdida de su hijo único, Hanno, y de su nuera, que se mataron en un accidente automovilístico en 1960. La señora Hahn nunca se recuperó de tan triste noticia.

Otto Hahn murió en Gotinga el 28 de julio de 1968 a consecuencia de una caída, y su mujer sólo le sobrevivió dos semanas.

CONCLUSIÓN

Severo Ochoa (1905- , premio Nobel de medicina en 1959) en entrevista publicada en *Ciencia y Desarrollo*, afirma que la investigación necesita de un "caldo de cultivo" o sea de un ambiente y de unas facilidades que, como lo hemos destacado en este texto, se dieron en la Alemania de principios de siglo.

Aunque hoy éstas son las verdades del barquero, conviene recordar lo que hace más de un siglo Louis Pasteur (1822-1895), que tenía 57 años cuando nació Otto Hahn, escribió en un folleto dirigido a los franceses:

Os suplico que os intereséis por esos sagrados edificios significativamente llamados laboratorios. Solicitad que sean multiplicados y completados. Son los templos del futuro, de las riquezas y del bienestar.

Otto Hahn descubrió la fisión nuclear porque, además de su propio talento, disponía del laboratorio adecuado, porque estaba rodeado de científicos brillantes y porque podía comunicarse y discutir sus resultados con los investigadores del mundo entero. Y él, que vivió dos guerras, quizás hubiera podido decir lo que Carlos Fuentes escribe en *El prisionero de las Lomas*: "la información es la base del poder, pero la condición es saber emplearla, o, llegado el caso, no emplearla: el silencio también es poder."

BIBLIOGRAFÍA

I. Asimov, *Historia de la energía nuclear*, Alianza Editorial, El libro de bolsillo, Madrid, 1985.

M. E. Brandan, *Armas y explosiones nucleares: la humanidad en peligro*, La Ciencia desde México, SEP-FCE-CONACYT, núm. 61, 1988.

S. Bulbulian, *La radiactividad*, La Ciencia desde México, SEP-FCE- CONACYT , núm. 42, 1987.

H.O. Denschlag, "The discovery of nuclear fission 50 years ago, a few remarks", *J. of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Articles*, 142, 5, 1990.

H. García Fernández, *La bomba y sus hombres*, Editorial Alhambra, 1987.

J. Hachette y J. Hytril, *Dictionnary of Scientific Biography*, C.C. Gillespie (editor), vol. IV, Charles Scribner's Sons, Nueva York.

O. Hahn, *New atoms, progress and some memories*, Elsevier Publishing Company, 1950.

O. Hahn, "The discovery of fission", *Scientific American*, p. 76, feb.,1958.

G. Hermann, *Five decades ago: from the "transuranics " to nuclear fission*, *Angew. Chem. Int. Ed.*, Inglaterra, 29, 481, 1990.

A. Mondragón, "La física nuclear" en *La física contemporánea 2. La ciencias del siglo XX*, UNAM, Guillermo Aguilar (comp.), México,1983. *Nobel Lectures (Physics)*, Incluye discursos y las biografías de los laureados 1922-1941. Publicada por la Fundación Nobel en 1965, Elsevier Publishing Company, Amsterdam, Londres, Nueva York, 1965.

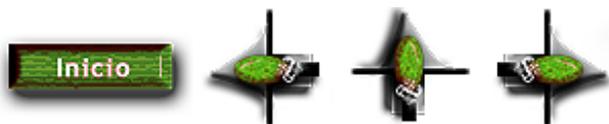
P. Pringle y J. Spigelman, *Los barones nucleares*, Planeta, Colección Al filo del tiempo, 1984.

J. Rickards, *Las radiaciones: reto y realidades*, La Ciencia desde México, SEP-FCE-CONACYT, núm. 8, 1986.

W.R. Shea, *Otto Hahn and the rise of nuclear physics*, D. Reideel Publishing Company, Dordrecht, Boston, Lancaster, 1983.

R.L. Sime, "Belated recognition: Lise Meitner's role in the discovery of fission", *J. of Radioanalytical and nuclear Chemistry articles*, 142, 13, 1990.

S. Weart, *La grande aventure des atomistes français*, Fayard, París, 1980.



VI. CONCLUSIÓN

PEDRO BOSCH GIRAL
SUILMA M. FERNÁNDEZ-VALVERDE

EN ALGUNAS ocasiones el recuerdo de la vida de los grandes pensadores puede ser un buen pretexto para intentar hacer un balance de su obra. A menudo será un motivo para enjuiciar fría y distanciadamente las teorías que se obtuvieron, sin el apasionamiento y la ceguera que producen la entrega total: hasta qué punto hay que atribuirle el descubrimiento de la fisión nuclear a Otto Hahn y no a Lise Meitner, sin tomar en cuenta que aún habrá quien lo reclame para Ida Noddack. Sin embargo, de no haber sido por las vicisitudes históricas, Meitner y Hahn hubiesen trabajado juntos y seguramente habrían firmado ambos tanto el artículo que informa sobre el resultado experimental como el artículo que lo interpreta. ¿Hasta qué punto se puede decir que sin la presión de las necesidades de la guerra se dispondría hoy del conocimiento necesario para el funcionamiento de las centrales nucleoelectricas o de la tecnología indispensable para curar ciertos tipos de cáncer?

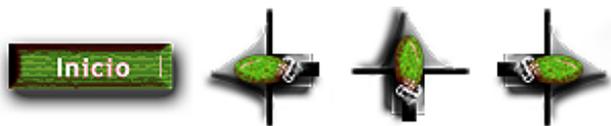
Situar la obra científica de estos pioneros de las ciencias nucleares en función de nuestra época es erigirse en juez, función que no es ni de nuestro gusto ni de nuestra incumbencia. No olvide el lector, antes de pronunciarse, que los investigadores son como los trabajadores de cualquier otra especialización: los estimula o los frustra su entorno. Son seres humanos miembros de una comunidad, preocupados por sus recursos y por su situación política y social. ¿Hasta qué grado sus decisiones están determinadas por la sociedad o son ellos los que controlan personalmente los acontecimientos? No olvidemos tampoco que las consecuencias de todo quehacer científico se deben también a los jefes de gobierno, a los industriales o a los militares. Son estas consecuencias lo que sí podemos y debemos subrayar aquí, pues tan trascendentales descubrimientos generaron no sólo un sinnúmero de aplicaciones prácticas, sino también una forma original de organizar la ciencia.

En este último terreno, aunque, menos obvios, los adelantos han sentado las bases de una nueva manera de pensar que arranca de los congresos Solvay, reuniones que Einstein llamaba "El aquelarre de las brujas". Ernest Solvay (1836-1922), industrial belga, y Walther Nerst (1864-1941) fueron los primeros que pensaron en organizar una reunión en la cual los físicos pudiesen discutir libremente los problemas más candentes de su campo. La primera se realizó en 1911, por invitación y además con gastos pagados, con el mecenazgo de Solvay, para los científicos más famosos de la época. En el primer consejo se encontraban M. Curie, A. Einstein, P. Langevin, M. de Broglie, F. A. Landerman y V. M. Goldschmidt, entre otros. Se celebraron en total siete reuniones. Desde entonces los investigadores de la radiactividad siguieron el ejemplo y se crearon nuevos comités para influir en las decisiones del gobierno; así se formó el Comité Frank en Estados Unidos, que desaconsejó el uso de la bomba atómica. Joliot encabezó el movimiento Átomos para la Paz, con la esperanza de que el uso de la energía nuclear fuese sólo en beneficio de la humanidad.

Hoy en día el OIEA (Organismo Internacional de la Energía Atómica) agrupa a los países que cuentan con instalaciones nucleares. No cabe duda de que éste es el primer paso hacia una justa internacionalización de la ciencia.

En cuanto a las aplicaciones prácticas, son innumerables. Hemos mencionado anteriormente las centrales nucleoelectricas, pero no menos importantes son los usos que se dan a los isótopos radiactivos, tanto en las ciencias de la atmósfera, en la medicina y hasta en la esterilización de los alimentos y material quirúrgico. En el Apéndice 1 se detallan estas aplicaciones, y en el Apéndice 2. se presentan los países que tienen centrales nucleoelectricas en operación. Y aunque estas listas sean impresionantes, quizás la aplicación más importante sea entender el mundo que nos rodea. Sólo desde el descubrimiento de la radiactividad y de la fisión nuclear se logra explicar, por ejemplo, por qué el Sol ha radiado calor y luz sin cambios perceptibles durante toda la historia de la civilización. Ninguna reacción química en el Sol podría explicar su luminosidad desde los tiempos de las pirámides y mucho menos desde la época de los dinosaurios.

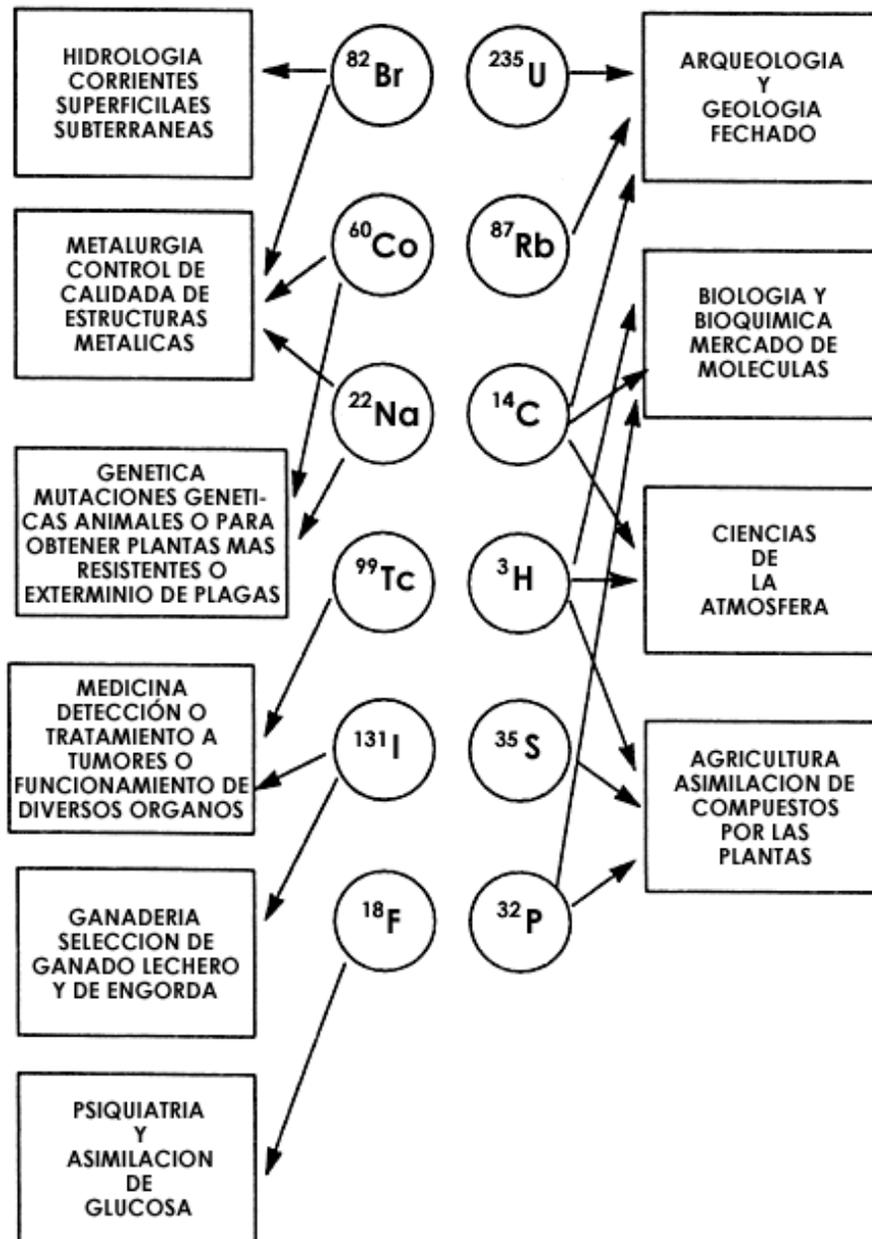
Para finalizar, hay que destacar que los descubrimientos aquí reseñados no son sólo acontecimientos de dimensiones históricas sino que, además, constituyen un excelente ejemplo de la evolución de la ciencia; que no sigue una serie de pasos sucesivos y lógicos sino que se desarrolla siguiendo trayectorias a menudo azarosas.



Inicio

APÉNDICE 1.

Algunos ejemplos de los isótopos radiactivos

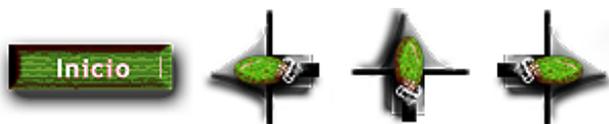


*Número
Atómico y
nombre del
elemento*

*Isótopos que integran la familia
(Entre paréntesis, los valores de sus vidas medias)*

92	U -238 (4.5 x 10 ⁹) años		U-234 (2 x 10 ⁵) años		
91		pa-234m (1.2 min.) Pa-234 (6.7 horas)			
90	Th-234 (24 días)		²³⁰ Th-230 (7.5 x 10 ⁴) años		
89	Actinio				
88	Radio		Ra-226 (1622 años)		
87	Francio				
86	Radón		Rn-222 (3.8 días)		
85	Astatinio			At 218 (1.3 seg.)	
84	Polonio		Po-218 (3 min.)	Po-214 (0.0002) seg.	Po-210 (138 días)
83	Bismuto			Bi-214 (19.7) min.	Bi-210 (5 días)
82	Plomo		Pb-214 (26.8) min.	Pb-210 (22 años)	Pb-206 (isótopo) estable
81	Talio			Ti-210 (1.3) min.	Ti-206 (4.3) min.
80	Mercurio			Hg-206 (8.5) min.	

Figura 1 del apéndice 1



APÉNDICE 2.

Número de reactores y potencia eléctrica neta de 1955 a 1990

	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1988	1990									
<i>País</i>	<i>Núm. MW(e)</i>		<i>Núm. MW(e)</i>		<i>Núm. MW(e)</i>		<i>Núm. MW(e)</i>		<i>Núm. MW(e)</i>									
Argentina					1	335	1	335	2	935	2	935	2	935				
Bélgica			1	11	1	11	4	1681	4	1681	8	5491	7	5480	7	5500		
Brasil									1	626	1	626	1	626	1	626		
Bulgaria							2	816	3	1224	4	1632	5	2585	6	3538		
Canadá			1	22	2	228	7	2538	10	5680	16	9994	18	12185	20	13947		
China														1	288			
Cuba														1	408			
Checoslovaquia						1	110	2	816	5	2040	8	3264	10	4040			
Finlandia								4	2310	4	2310	4	2310	4	2310			
Francia		2	79	4	329	8	1454	10	2607	22	14308	43	37743	55	52588	58	56528	
Alemania Democrática					1	62	3	878	5	1694	5	1694	5	1694	8	2102		
Alemania Federal			1	15	7	920	9	3323	14	8633	19	16413	23	21491	25	23011		
Hungría										2	825	4	1645	4	1645			
India					2	300	3	507	4	714	6	1154	6	1154	8	1594		
Italia			3	563	3	563	3	563	4	1423	3	1273	2	1120	2	1120		
Japón			2	168	5	1268	13	6301	24	15018	33	23664	38	28253	41	30367		
Rep. de Corea									1	556	5	3570	8	6270	9	7220		
México														1	654			
Holanda					1	56	2	508	2	508	2	508	2	508	2	508		
Pakistán							1	125	1	125	1	125	1	125	1	125		
Sudáfrica											2	1842	2	1842	2	1842		
España					1	53	3	1073	3	1073	8	5599	10	7519	10	7544		
Suecia			1	10	1	10	5	3197	8	5682	12	9673	12	9673	12	9673		
Suiza					1	350	3	1022	4	1962	5	2952	5	2952	5	2952		
Reino Unido		8	392	22	2544	27	3490	30	4564	33	6820	38	10184	40	11921	40	12428	
Estados Unidos		2	361	8	806	17	6176	53	36338	68	50871	93	77549	108	95273	110	97623	
URSS	1	5	5	365	10	894	13	1387	23	4997	34	12 256	50	26 940	56	33 823	60	38 746
Yugoslavia												1	632	1	362	1	632	
MUNDO	1	5	17	1197	53	5 362	90	16 428	176	71 483	253	134 897	374	250 312	429	310 812	457	334 141

NOTA: Estimados para 1990, basados en los datos sobre construcción y operación hasta el 31 de diciembre de 1988

FUENTE: OIEA, "Nuclear Power Reactors in the World", Reference Data Series Num. 2, Organismo Internacional de la Energía Atómica, Viena, 1990.

Inicio

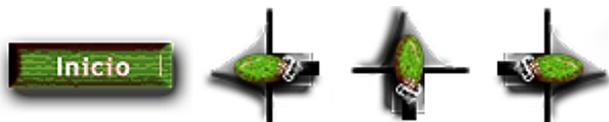




COLOFÓN

Este libro se terminó de imprimir y encuadernar en el mes de junio de 1994 en Impresora y Encuadernadora Progreso, S. A. de C. V. (IEP SA), Calz. de San Lorenzo, 244; 09830 México, D. F. Se tiraron 10 000 ejemplares. Hizo la formación de este libro: SUSANA GUZMÁN DE BLAS, del Taller de composición del FCE.

La Ciencia desde México es una coedición del Fondo de Cultura Económica. La Secretaria de Educación Pública y el CONACYT. La coordinan editorialmente MARCO ANTONIO PULIDO Y MARÍA DEL CARMEN FARÍAS



CONTRAPORTADA

En este libro se hace la biografía de los descubridores de la radiactividad, de la radiactividad artificial, de la estructura del átomo, de las propiedades del neutrón y de la fisión nuclear; es decir, se ahonda en la vida de los responsables de los cinco peldaños por los que se ascendió o lo que hoy constituyen las ciencias nucleares y que formaron: un grupo francés (Becquerel, los Curie y los Joliot- Curie), un grupo anglosajón (Chadwick, Rutherford y Thomson), uno italiano (Fermi) y finalmente uno austriaco-alemán (Frisch, Hahn, Meitner y Strassman).

Algunos de estos investigadores se comprometieron en su tiempo y reaccionaron valientemente contra la injusticia, participando en la vida política de sus países: Hahn militó activamente en contra de las armas nucleares y una de las facetas más atractivas de Joliot fue su compromiso pacífico que culminó al alcanzar la presidencia del Comité de la Paz.

Sigamos, pues, las huellas que los pioneros de la radiactividad dejaron tras de sí en su continuo afán por entenderla estructura y los propiedades de la materia. Con ellos tocaremos la retirada ante los callejones sin salida y con ellos nos asombraremos de las maravillas de la naturaleza. Será difícil no tomar partido en sus querellas científicas y en sus disputas personales, pero revivirlas no sólo ilustra la personalidad de cada uno de ellos sino que revela "cómo se hace la ciencia" y cual es el entorno necesario para que florezca.

Las ciencias nucleares hoy en día conforman una fuente moderna y activa que ha enriquecido ramas del conocimiento tan diversas como la arqueología, la medicina y la agricultura. Así, el fechado de múltiples piezas precolombinas hubiera sido imposible sin los descubrimientos de Becquerel y sus seguidores. Del mismo modo el mundo moderno, con sus necesidades insaciables de energía, sería inconcebible sin los hallazgos de Meitner, Hahn y Strassman. Las aplicaciones prácticas son innumerables, pero quizá la más importante sea entender el mundo que nos rodea.

Todos los autores de este libro son egresados de universidades nacionales y han obtenido sus doctorados tanto en la UNAM como en el extranjero. También todos son actualmente investigadores del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares y Pedro Bosch es además profesor de tiempo completo en la UAMI . Se dedican a diversas especialidades que van desde la química de los lantánidos y actínidos hasta el intercambio isotópico en los sólidos, la metrología de las radiaciones ionizantes, la retención de materiales radiactivos en aluminosilicatos o la detección del radón, relacionada con la sismología, la vulcanología y los daños a la salud, Portada: Eppem, mural en el edificio del reactor, ININ .

