

Historia de la radiación, la radiactividad y la radioprotección

Bo Lindell

Tomo I La caja de Pandora:
el período previo a la Segunda Guerra Mundial



S.A.R.

Sociedad Argentina
de Radioprotección



Historia de la radiación, la radiactividad y la radioprotección

Tomo I: La Caja de Pandora
el período previo a la Segunda Guerra Mundial

Bo Lindell

Traducción oficial al español
Editada por la Sociedad Argentina de Radioprotección
con la autorización de su autor, Dr. Bo Lindell

Patrocinada por la Autoridad Regulatoria Nuclear

Traductor

Traductor público Ricardo Naidich

Revisores Técnicos

Ing. Carlos Chiossi

Ing. Eduardo Felizia

Dr. Juan Carlos Giménez

Dr. Severino Michelin

Revisión General

Lic. Roberto Rojkind



S.A.R.

Sociedad Argentina
de Radioprotección



Lindell, Bo

Historia de la radiación, la radioactividad y la radioprotección : La caja de Pandora / Bo Lindell ; con prólogo de Abel González. - 1a ed. - Buenos Aires : Sociedad Argentina de Radioprotección, 2012.

E-Book.

Traducido por: Ricardo Naidich

ISBN 978-987-26798-1-1

1. Radiación. 2. Radioactividad. 3. Historia. I. González, Abel, prolog. II. Ricardo Naidich, trad. III. Título
CDD 539.209

Diseño de tapa, interior y encuadernación: El Grifo. Comunicación Visual

Edición especial sin valor comercial: diciembre de 2012

ISBN: 978-987-26798-1-1

© Sociedad Argentina de Radioprotección

Av. del Libertador 8250 Of. 122 (1429)

Buenos Aires - REPUBLICA ARGENTINA

Tel / Fax: 4704-1472

info@radioproteccionsar.org.ar

www.radioproteccionsar.org.ar

Queda hecho el depósito que establece la ley 11.723.

Impreso en Argentina. Industria argentina.

Reservados todos los derechos. Queda prohibida, sin la autorización escrita de los titulares del Copyright, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, incluidos la reprografía y el tratamiento informático.

Prólogo a la edición en español

La Sociedad Argentina de Radioprotección (SAR) presenta en este libro el resultado de uno de sus mayores desafíos: la traducción del sueco y la edición del primer volumen de la obra magna de Bo Lindell sobre la historia de la investigación científica relacionada con la radiación, en cuatro tomos con títulos tomados de la mitología griega.

Este primer tomo se subtitula:

La Caja de Pandora (Πανδώρα Pandora, había sido advertida por su hermano Prometeo de no aceptar ningún regalo del padre de los dioses, Zeus; pero no escuchó a su hermano y aceptó una caja o jarra que contenía bienes y males y al abrirla ocasionó que los bienes volaran regresando a las mansiones de los dioses, sustrayéndose de la vida de los humanos, los que en adelante solo viven afligidos por males y solo pudieron conservar de aquellos bienes la esperanza).

Los tomos sucesivos se subtitulan:

- **La Espada de Damocles** (Δαμοκλής, Damocles, aceptó un intercambio de roles con Dionisio, el tirano de Siracusa, para disfrutar del poder real transitoriamente; pero al final de un opíparo banquete reparó que directamente sobre su cabeza colgaba una afilada espada atada por un único pelo de crin de caballo; así que pidió al tirano abandonar el intercambio, ejemplificando el peligro que se instala en aquellos que ostentan un gran poder, que pueden perder de golpe junto con su vida.)
- **Los Trabajos de Hércules** (Ηρακλής, Heracles – o Hércules para los Romanos, debió hacer una penitencia de doce trabajos, una serie de enfrentamientos con varios animales, que dio lugar a la adjetivación de herculeano para referirse a lo que requiere un gran esfuerzo.)
- **La Frustración de Sísifo** (Σεισυφος, Sísifo, fue obligado a empujar una piedra enorme cuesta arriba por una ladera empinada, pero antes de que alcanzase la cima de la colina la piedra siempre rodaba hacia abajo, y Sísifo tenía que empezar de nuevo desde el principio).

Esta obra es una verdadera enciclopedia radiológica en la que pueden aspirar a iluminarse los lectores casuales y también los lectores expertos.

El autor, *Bosse*, para sus colegas y amigos (porque es casi imposible ser colega y no amigo de Bosse), comenzó su carrera en 1948 como colaborador de Rolf Sievert, el pionero de la física de la radiación y la protección radiológica, cuyo apellido ha sido inmortalizado en la unidad de dosis efectiva de radiación. Bosse es ampliamente conocido por sus actividades internacionales, especialmente en el Comité de las Naciones Unidas para el Estudio de los Efectos de las Radiaciones Atómicas (UNSCEAR) al que sirvió desde 1956 a 1990 (desde 1970 a 1971 como Presidente), en la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP) a la que ha servido desde 1957 hasta el presente (de 1957 a 1962 como Secretario Científico, y de 1977 a 1985 como Presidente) y en el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA) en el que fue autor de innumerables publicaciones y presidente de múltiples grupos de trabajo. Fue director general y es emérito del Instituto Sueco de Protección Radiológica (SSI) al que sirvió desde 1948 al 2004 (desde 1966 a 1982 como jefe de los reguladores suecos en protección radiológica). Fue además fundador de la Academia Sueca sobre Riesgo.

Además de su extraordinaria contribución científica, Bosse siempre estuvo interesado en la comunicación de los temas de la radiación al gran público y no solo al relativamente reducido grupo de especialistas en estos temas, y con ese objetivo es autor o coautor de varias publicaciones de divulgación científica. La relación de Bosse con Argentina es tan larga y fructífera como su amistad con Dan Beninson. En realidad, Dan llegó a conocer a Bosse gracias a su relación con Sievert la que, además de la protección radiológica, reconocía como interés común un particular fanatismo por los habanos.

Esta amena obra de Bosse nos transporta a los albores de la ciencia. Nos da cuenta cómo, a partir de unos 500 años antes de Cristo, la creciente comprensión humana de los fenómenos naturales como la luz, el magnetismo y la electricidad prepararon el terreno para el descubrimiento de la radiación y la radiactividad a finales del siglo XIX. Así el lector transita desde Heráclito y Lucrecio a Fermat y Gilbert, y a Newton, a Volta, a Faraday, y a Maxwell, solo por nombrar algunos de los genios que construyeron nuestro saber científico. Bosse nos recuerda el apasionante descubrimiento accidental de la radiación y de la radioactividad que la genera, por Becquerel, y de los rayos X, la radiación generada por los rayos catódicos, por Röntgen. Esos rayos catódicos que en 1895 se suponían como partículas muy pequeñas (el término electrón no había sido aun acuñado), eléctricamente cargadas que se movían con una velocidad, para entonces increíble, de unas milésimas de la velocidad de la luz. Y nos enteramos de uno de los aspectos más impresionantes de la historia de la radiación: cuán rápido este descubrimiento se propagó alrededor del mundo y con qué rapidez se desarrollaron sus aplicaciones médicas.

Y así el libro nos transporta a través de la historia de la radiación y la protección radiológica, de una manera amena y a la vez apasionante, llena de leyendas increíbles. Por ejemplo, que la gran explosión del volcán Krakatoa en 1883 jugó un papel decisivo en la comprensión de ciertos efectos de los ensayos de armas nucleares en las Islas Marshall en la década de 1950. O que el poco claro término fisión nuclear fue inspirado por el término técnico utilizado entonces para la división celular bacteriana. O que el corresponsal de guerra Winston Churchill se quejó, tan sólo 20 meses después del descubrimiento de Röntgen, que debido a un defecto en una máquina de rayos X se había perdido la vida de un soldado. Es que la historia de la ciencia, de toda la ciencia, es una sucesión de hechos increíbles. Y para aprender realmente la ciencia hay que conocer los episodios que enhebraron su construcción. Y esto es lo que hace la obra de Bosse.

Para hacer conocer de esta manera a la ciencia de la radiación hacia falta un genio. Y sí, Bosse es un genio, un fenomenal genio. Su profunda influencia en la protección contra las radiaciones, y de hecho en la protección del medio ambiente y en la investigación del riesgo en general, incluye un flujo abundante de publicaciones científicas en todos los aspectos de la protección de las personas contra los efectos nocivos de la radiación. En este contexto, tal vez sus esfuerzos más importantes hasta ahora son los relativos a la energía nuclear. El concepto de compromiso de dosis, inventado por Bosse, se utiliza en todo el mundo para regular las emisiones de sustancias radiactivas, teniendo en cuenta no sólo la dosis, a menudo trivial, de los contemporáneos inmediatos a las emisiones, sino también el efecto global durante plazos prolongados. A la larga, su continua influencia personal sobre la protección radiológica como una rama de la ciencia y como un paradigma o modelo a seguir para otros tipos de protección del medio ambiente puede alcanzar una importancia aún mayor.

Nuestro común y gran amigo Jack Valentin, otro renombrado científico sueco que supo comandar brillantemente la secretaría científica de la ICRP, resumió brillantemente las cualidades de Bosse de esta manera:

- Bosse es fundamentalmente un científico idóneo y un intelectual brillante; su nombre es reconocido, admirado y apreciado por sus pares de la protección radiológica.
- Bosse siempre respaldó y se hizo apoyar por organizaciones competentes, como el SSI, UNSCEAR o la ICRP.
- Bosse es una persona totalmente honesta, siempre dispuesta a admitir sus propios errores.
- Bosse es valiente y nunca dudó en expresar hechos y sentimientos que podían ser políticamente indeseables para personas y países poderosos.
- Bosse es curioso y siempre mostró un interés genuino en la opinión de los colegas que no comulgaban con sus puntos de vista

Pero además de su genio y de estas cualidades extraordinarias, Bosse es un ser humano excepcional, una persona ejemplar, sencilla y profundamente cariñosa. En realidad, debo decir que una de las cosas más beneficiosas que me ha pasado en mi vida es haber conocido a Bosse por tantos años (ni recuerdo cuantos, pero deben estar acercándose al medio siglo). Las pláticas con Bosse me llenaron de sabiduría y sus frecuentes visitas a mi hogar llenaron de alegría y amor a mi familia. Lo recuerdo jugando al ajedrez con mi hijo Ariel Walter, quien ya escribía artículos diplomáticos que orientarían su futura carrera en la Cancillería argentina. Lo recuerdo sorprendiéndose del viraje de Anabel Ariadna quien había modificado su vocación para estudiar drama por esas ciencias biológicas que la llevaría a ser una exitosa médica emergentóloga. Lo recuerdo con Martín Abel, compartiendo adivinanzas de nombres de capitales extrañas, quien era un erudito geógrafo para su edad y como para imaginar su futura y exitosa carrera académica en la historia de las relaciones internacionales. Lo recuerdo descubriendo a la entonces pequeña Elizabeth Laura devorando arenques nórdicos sin sospechar que finalizaría siendo una reconocida pediatra. Lo recuerdo obsequiando a mi esposa esos fabulosos chocolates que solo los Suecos saben hacer (y explicándole ceremoniosamente la tecnología que los hace tan ricos). Lo recuerdo trayendo a mis hijos ese parónimo de dulce de leche que hacen los suecos y noruegos del norte (como si hubiera más norte que el norte de la tierra escandinava) con la leche de alce y tratando de convencerlos (sin éxito) que era tan exquisito como el clásico dulce argentino. Lo recuerdo contándonos historias de viejas canciones suecas que lo conectaban con nuestras tierras ('Carmencita de Samborombóm).

Genio y figura, Bosse nos emocionó a todos cuando recordó por video a su amigo Dan durante la apertura del XIIavo Congreso de la Asociación Internacional de Protección Radiológica (IRPA 12) que la SAR organizó exitosamente en Buenos Aires en el 2008.

La Caja de Pandora fue publicado originalmente en idioma sueco en 1996, y hasta ahora solo había sido traducido al alemán (por Traute Roedler-Yogelsang, el jefe de redacción de la conocida publicación *Biofísica Ambiental y de la Radiación [Radiation and Environmental Biophysics]*). Nunca entendí por qué Bosse escribió esta monumental obra en sueco. Él, cuyo sutil dominio del inglés compite con el de los anglo-sajones más sofisticados, habría podido llegar a un público más vasto si hubiera utilizado esa lengua franca de nuestros días. Pero prefirió su idioma natal, ese idioma escandinavo que Borges tanto admiraba. La decisión me hizo recordar una cena que alguna vez disfrutamos en un pequeño restaurante de Estocolmo; en medio

de la comilona en una radio comenzó a sonar el himno sueco, y todos los presentes se levantaron a una posición erguida y solemne hasta que la música cesó: comprendí entonces – y le hice notar a mi co-comensal Bosse – que el nacionalismo es un sentimiento más generalizado de lo que creemos y que también existe en la socializada Suecia.

Esta edición de la SAR es pues la segunda traducción de esta obra. Fue llevada a cabo por el reconocido experto y traductor público de sueco y danés, el Sr. Ricardo Naidich. Los difíciles tecnicismos del texto fueron revisados y editados ad honorem por los Ingenieros Carlos Chiossi y Eduardo Felizia. Todos ellos hicieron un trabajo excelente que debe ser congratulado. La SAR realizó un esfuerzo extraordinario tanto intelectual como económico y su Comisión Directiva, llevó a cabo una tarea difícil y digna de encomio.

Cuando le sugerí a Bosse que la SAR podría llevar a cabo la incommensurable tarea de traducir su obra del espinoso idioma sueco al no menos complicado español, con el objetivo de divulgarla en el amplio abanico de lectores en esta lengua en toda Iberoamérica, creo que se convenció de algo que siempre sospeché: que mi quijotismo se alejaba peligrosamente del realismo. Quizás por eso le cedió a la SAR sus derechos de autor libre de cargo.

Pero esta vez, querido Bosse (¡por fin!), has errado: el resultado está en manos del lector..... ¡que lo disfrute!

Gracias SAR por honrarme con prologar esta monumental obra.

Abel J. González

Prólogo

Este libro es el primer tomo de una serie. En él se cuenta cómo el ser humano aprendió qué son la radiación y los elementos radiactivos, cómo se utilizaron esos conocimientos para bien y para mal y cómo la humanidad aprendió a protegerse de los riesgos que ello generaba. Esta primera parte del relato comprende el período que se extiende hasta antes de la II Guerra Mundial, en el momento en que se logran dividir algunos núcleos pesados en un proceso que emite grandes cantidades de energía. Espero poder contar en el segundo tomo cómo esos conocimientos fueron utilizados para desarrollar y utilizar las armas nucleares antes de finalizar la guerra, si los ensayos nucleares atmosféricos realizados después de la conflagración dieron lugar a la contaminación radiactiva del medio ambiente y acerca de la investigación radioecológica que comenzó a realizarse a mediados de la década de 1950. En el tercer volumen pienso relatar sobre el uso pacífico de la energía nuclear y cómo se ha intentado remediar los riesgos que esto conlleva. El último tomo trata acerca del desarrollo tecnológico durante la última parte del siglo XX.

Paralelamente al relato acerca del desarrollo tecnológico y la adquisición de nuevos conocimientos, hay un informe sobre el desarrollo de las actividades relacionadas con la radioprotección, a nivel internacional en un gran trabajo de cooperación, y también en Suecia, gracias a los aportes pioneros de Rolf Sievert y su institución.

La obra no es una presentación científica o histórico-tecnológica en un sentido estricto. Mi intención ha sido contar acerca de la imagen que yo mismo tengo de ese desarrollo, gracias al trabajo que he realizado en este campo durante mucho tiempo. No he tratado de *crear* esa imagen a través de la investigación y el estudio crítico de las fuentes. No he tenido tiempo suficiente para ello. He utilizado en su lugar la bibliografía disponible para darle contenido a aquello que conozco a grandes rasgos.

El índice de nombres y el índice temático¹ al final del libro están destinados al uso del mismo como un diccionario enciclopédico. Por eso, tanto en el texto como en las notas al pie, he citado más información detallada que la necesaria en el relato en sí. El lector no debe asustarse con las fórmulas que aparecen en algunos de los capítulos: no se trata de matemática avanzada y le recomiendo al lector que intente seguirla, porque puede llegar a sorprenderse más de una vez al comprenderla. Para evitar que la lectura sea demasiado árida, he incluido algunos componentes anecdóticos de color. Estoy convencido de que es necesario hacerse una idea respecto de la vida de los principales protagonistas y de su entorno para poder comprender realmente el desarrollo. Las traducciones son más, cuando no se indica lo contrario.

Agradezco la ayuda recibida de muchos colegas del Instituto de Radioprotección (Strålskyddsinstitutet) principalmente de Ulf Bäverstam y Jack Valenti, y de los jefes del Instituto, Gunnar Bengtsson y Lars-Erik Holm, como así también la asistencia del profesor Rune Walstam. Esos amigos me han salvado de las peores metidas de pata. El Instituto de Radioprotección también ha contribuido económicamente en la edición de este libro. Valoro también el ambicioso trabajo de investigación con las editoriales realizadas por el redactor Björn Wahlberg. Y sobre todo debo agradecer la paciencia de mi esposa Marrit durante mi trabajo con este libro.

Bo Lindell

¹ Nota de la redacción: el índice temático no ha sido incluido en la versión publicada en Internet, ya que la búsqueda de términos se puede realizar mediante la utilización de buscadores de páginas Web.

1 | La isla volcánica

-¿Remontamos?
-¡No, al contrario, descendemos!
-¡Mucho peor, señor Ciro! ¡Caemos!
-¡Vive Dios! ¡Arrojad lastre!
-Ya se ha vaciado el último saco.
-¿Se vuelve a elevar el globo?
-No.
-¡Oigo un ruido de olas!
-¡El mar está debajo de la barquilla!
-¡Y a unos quinientos pies!

Entonces una voz potente rasgó los aires y resonaron estas palabras:

-¡Fuera todo lo que pesa! ¡Todo! ¡Sea lo que Dios quiera!

Estas palabras resonaron en el aire sobre el vasto desierto de agua del Pacífico, hacia las cuatro de la tarde del día 23 de marzo de 1865.

Esas fueron las palabras que utilizó *Julio Verne* (1828—1905) en el prólogo de su novela *La isla misteriosa*, un libro de aventuras pero también un resumen del conocimiento humano sobre las ciencias naturales. La época era la de la exactitud. Para el científico nada era imposible dentro de los límites de las leyes naturales. Y las leyes naturales eran consideradas entonces como definitivas. En el campo de las ciencias naturales regía realmente la “ley y el orden” (N. del T.: en inglés, en el original: “law and order”). La exactitud tiene su propio romanticismo. La continuación del prólogo citado dice:

Seguramente nadie ha olvidado el terrible viento del nordeste que se desencadenó en el equinoccio de aquel año y durante el cual el barómetro bajó a setecientos diez milímetros. Fue un huracán sin intermitencia, que duró del 18 al 26 de marzo. Produjo daños inmensos en América, en Europa, en Asia, en una ancha zona de 1.800 millas⁽¹⁾, que se extendió en dirección oblicua al Ecuador, desde el trigésimo quinto paralelo norte hasta el cuadragésimo paralelo sur. Ciudades destruidas, bosques desarraigados, países devastados por montañas de agua que se precipitaban como aludes, naves arrojadas a la costa, que los registros del Bureau-Veritas anotaron por centenares, territorios enteros nivelados por las trombas que arrollaban todo lo que encontraban a su paso, muchos millares de personas aplastadas o tragadas por el mar; tales fueron los testimonios que dejó de su furor aquel huracán, que fue muy superior en desastres a los que asolaron tan espantosamente La Habana y Guadalupe, uno el 25 de octubre de 1810, otro el 25 de Julio de 1825.

La exactitud reduce de alguna manera esas atrocidades a los gritos de la tormenta en las oscuridades de la noche, fuera de la cabaña segura y acogedora donde las brasas chisporrotean en la chimenea y donde resulta hermoso inquietarse un poco ante las descripciones más horribles, siempre y cuando el final sea feliz.

Algo que, probablemente, era característico de la época. El ser humano no era todavía el señor de la naturaleza y la furia de los elementos podía ser terrible, las tormentas causaban estragos, los buques naufragaban, los terremotos arrasaban lo que la mano del hombre había construido y las enfermedades contagiosas golpeaban imprevisiblemente con efecto devasta-

(1) En millas inglesas

dor. Pero el ser humano ya había obtenido la llave para abrir el portón de un futuro en el que se esperaba que la naturaleza estuviera dispuesta a ser su esclava. Se creía que se había alcanzado la comprensión definitiva de las fuerzas de la naturaleza. Se afirmaba conocer las leyes de la naturaleza y podían ser utilizadas en beneficio propio: era la llave del conocimiento la que sostenía en su mano el ser humano.

El futuro sería, sin duda, bueno. La tierra había existido durante miles de millones de años; el ser humano durante millones. Milenio tras milenio la evolución había estado inmóvil, más allá de algunos descubrimientos tales como la rueda y el arte de hacer fuego. Pero de repente, durante el último siglo, durante sólo algunas pocas generaciones, se habían develado los secretos que se ocultaban detrás de las leyes que regían a la naturaleza.

Bueno, quizá no todo había estado tan inmóvil. Existía por cierto una herencia cultural de creciente conocimiento en el campo de la matemática y la astronomía. ¡Pero con qué rapidez la evolución se había dirigido al objetivo, cuanto más rápido, más cerca había llegado! Y ya casi había arribado a la meta. ¡Qué maravillosa alegría haber nacido en una época donde aparecían tantas cosas!

El desarrollo de las ciencias naturales había sentado las bases para el perfeccionamiento del arte de la ingeniería. El líder de los hombres que Julio Verne dejó naufragar cuando su globo aerostático hubo perdido su resistencia era, lógicamente, un ingeniero. Él puede ser visto como el símbolo de esas disciplinas y sus compañeros lo adoraban. Era evidentemente él quien conocía todas las respuestas y era igualmente obvio que había una respuesta para todas las preguntas posibles.

¿No está vivo nuestro ingeniero? ¡Ya encontrará medio de procurarnos fuego!

-¿Con qué?

-Con nada.

¿Qué podía replicar Pencroff? No respondió, porque al fin y al cabo participaba de la confianza que sus compañeros tenían en Ciro Smith. El ingeniero era para ellos un microcosmo, un compuesto de toda la ciencia e inteligencia humana. Tanto valía encontrarse con Ciro en una isla desierta como sin él en la misma industriosa ciudad de la Unión. Con él no podía faltar nada; con él no había que desesperar. Aunque hubieran dicho a aquellas buenas gentes que una erupción volcánica iba a destruir aquella tierra y hundirlos en los abismos del Pacífico, hubieran respondido imperturbablemente: ¡Ciro está aquí! ¡Ahí está Ciro!

Los recursos de la naturaleza que hoy están a disposición del ser humano todavía eran considerados como inagotables. El cuidado del ambiente era tan actual y necesario como las preocupaciones por un bosque de bayas donde podía jugar un niño. La naturaleza estaba llena de bayas y frutos, tanto de manera figurada como literal, y el ser humano solo necesitaba recogerlos.

La mayoría de los fenómenos de la naturaleza tiene un vigor y una paciencia intrínsecos. Si yo tiro de la rama de un árbol, ésta cede y si tiro más fuerte, cede aún mucho más. Cuando suelto la rama vuelve a su posición original. En gran medida los daños están en proporción al efecto y no hay ningún daño duradero mientras que el efecto sea leve. Sin embargo, si tiro muy fuerte, la rama se rompe.

Mientras que el efecto del ser humano sobre la naturaleza sea moderado, también el daño será moderado y reversible. Toda la vida natural constituye un número de efectos y el ser humano ha podido ser visto como parte de la naturaleza, que influye y es influido por ella. La experiencia decía que la naturaleza soportaba las intenciones del ser humano. Uno podía

reírse con indulgencia hacia quienes se preocupaban por lo contrario. Nadie descreía de la experiencia. Se reaccionaba más o menos como el viejo que, indignado, mascullaba: “¡Un poco de decencia, granuja! ¿Por qué no puedes ponerte el traje? Le quedaba bien a mi abuelo, luego a mi padre y más tarde a mí. ¿Por qué no te quedaría bien a ti?”

He escuchado comentarios semejantes. En 1951 ascendí a una montaña en Suiza con un funicular que, a juzgar por la construcción, pertenecía más a un museo que a un medio de transporte prestando un servicio. El funicular ascendió y yo estaba solo con el conductor. Tranquilizado por la ilusión de que era poco probable que tuviera lugar un accidente justo a mí y en ese momento, no reflexioné seriamente sobre la gravedad de los riesgos. Pero puesto que necesitaba un tema de conversación (y el de la seguridad lo tenía a mano) le pregunté al conductor si nunca había sentido miedo ante un accidente. Me contestó mientras me miraba con compasión:

— Debo decirle que este funicular ha estado funcionando todos los días desde 1883 sin que nunca haya sucedido nada y por eso está demostrado que es muy seguro.

A pesar de las buenas experiencias anteriores, no se debe presionar demasiado ni a la naturaleza ni a la tecnología. Ciro Smith y sus compañeros de la isla misteriosa no estaban, al igual que la sociedad contemporánea del siglo XIX, en una situación donde pudieran presionar demasiado a la naturaleza. En tierra firme existían, por supuesto, las excepciones, tal como la devastación de los bosques y las edificaciones con higiene deficiente, que alteraban el orden de la naturaleza en beneficio de los piojos, las ratas y las epidemias. Pero el ser humano deterioraba la sobreabundancia de la naturaleza sólo de manera marginal. El daño que se causaba crecía lentamente en proporción al efecto. La naturaleza era como era. No estaba en equilibrio estacionario (nunca lo había estado) pero todavía seguía impasible frente a la actividad del hombre.

En la isla Lincoln, el nombre que le habían dado los naufragos a la isla misteriosa, los colonos construyeron un sociedad tecnológica paradisíaca mediante el aprovechamiento desenfrenado de los recursos naturales y aplicando los últimos descubrimientos del arte de la ingeniería con fantasía y bravura. Existía en realidad una sola limitación grave que condenaba a su sociedad a la muerte en cierto plazo: No había ninguna mujer en la isla. No había lugar para las mujeres en el espíritu de aventura. Los aventureros eran niños grandes y la ciencia popular no comprendía todavía todos los capítulos de la biología. Julio Verne escribió su novela a mediados de la época victoriana, en 1875.

Y la naturaleza todavía se mostraba poderosa. La isla Lincoln era de origen volcánico y estaba condenada a la aniquilación. El medio que utilizó el autor para finalizar la aventura fue una terrible catástrofe que tuvo lugar el 9 de marzo de 1869:

El sublime horror de este espectáculo es superior a toda descripción. Durante la noche parecía que un Niágara de líquido metal se precipitaba sobre la playa con sus vapores incandescentes arriba y sus mares hirvientes abajo.

Tal como sucedía con todo lo que Julio Verne predijo con frecuencia, pronto tendría lugar un acontecimiento dramático. Y él lo había hecho basado en sus conocimientos sobre anteriores catástrofes, como por ejemplo la del volcán Tambora en 1815 en Indonesia. La erupción del volcán causó tal contaminación en el aire que no hubo verano en Europa al año siguiente y

luego cayó nieve durante la temporada estival en Massachusetts. Otra catástrofe había tenido lugar con el volcán Thera, pero no fue una erupción sino una violenta explosión de vapor, después de que entrara agua a raudales. Fue este destino el que Julio Verne le tenía preparado a la isla Lincoln. En el verano de 1883 se demostró que éste no había sido un acontecimiento improbable descrito en su novela. En esa fecha estalló Krakatoa.

Esta isla, que prácticamente desapareció con la catástrofe, se encontraba en el estrecho de Sonda, entre Java y Sumatra. Se sabía que era volcánica y que un volcán entró en erupción en 1680, pero desde entonces había estado en calma durante más de 200 años. Ya durante la primavera de 1883 el volcán había dado avisos de advertencia. La erupción tuvo lugar de manera explosiva durante dos días de agosto del mismo año. Esto hizo que el agua del mar ingresara al volcán y se convirtiera en vapor. La gran catástrofe era un hecho; el vapor tuvo efectos explosivos devastadores.

Cuando Julio Verne predijo estos acontecimientos ocho años antes, dejó que Ciro Smith le explicara al escéptico marinero lo que le sucedería a la isla Lincoln:

-Que he visto que esas hendiduras se ensanchan bajo la presión interior; que la muralla de basalto se resquebraja poco a poco y que dentro de un tiempo más o menos breve dará paso a las aguas del mar de que está llena la caverna.

-¡Bueno! -replicó Pencroff, que trató todavía de decir una chanza-. El mar apagará el volcán y todo habrá concluido.

-Sí, todo habrá concluido -dijo Ciro Smith-. El día en que el mar se precipite a través de la pared y penetre en la chimenea central hasta las entrañas de la isla donde hierven las materias eruptivas, ese día, Pencroff, la isla Lincoln saltará por el aire como saltaría Sicilia si el Mediterráneo se precipitara en el Etna.

Los colonos no contestaron a esta frase afirmativa del ingeniero. Habían comprendido el peligro que les amenazaba. Además, Ciro Smith no exageraba de modo alguno. Muchos han tenido la idea de que podrían extinguirse los volcanes, levantados casi todos a orillas del mar o de los lagos, abriendo paso a las aguas, pero ignoraban que de esa manera se habrían expuesto a hacer saltar una parte del globo como una caldera, cuyo vapor adquiere una súbita presión o un aumento inmediato de temperatura. El agua, precipitándose en un recinto cerrado cuya temperatura puede calcularse en millares de grados, se evapora con tan repentina energía, que no habría corteza terrestre que pudiera resistirla.

Fue exactamente lo que sucedió en Krakatoa. El estruendo de las explosiones se escuchó no solo en Filipinas y Australia, sino incluso en lugares tan alejados como Hong Kong y Madagascar, ésta última a una distancia de casi 5000 kilómetros. Una ola de más de 30 metros de altura arrasó con todo, a lo largo del Estrecho de Sonda. Esto dio lugar a olas que barrieron en dirección a África sobre el Océano Índico y hacia América del Sur sobre el Océano Pacífico. Las olas continuaron sobre el Atlántico y se notaron hasta en el canal inglés. A lo largo del Estrecho de Sonda y las costas cercanas murieron 36.000 personas.

Las ondas de presión en el aire generaron cambios repentinos en los barómetros de todo el mundo y se propagaron entre 4 y 5 veces alrededor del mundo, antes de que fueran demasiado débiles como para que pudieran ser registradas. La materia volcánica fue lanzada a la estratósfera y se esparció con los vientos alrededor del mundo. Esto conllevó un fenómeno óptico singular: después de varios meses de que la explosión tuviera lugar, todavía podían verse

caídas de sol muy coloridas en todo el orbe. Cerca de Krakatoa, pero en un área de un millón de kilómetros cuadrados (el doble de la superficie de Suecia), la propagación troposférica del material volcánico generó fuertes contaminaciones del aire que oscurecieron los cielos. La cantidad de materia que se esparció con la erupción ha sido calculada en 18 kilómetros cúbicos.

Al igual que la explosión ficticia de la isla Lincoln, la catástrofe de Krakatoa no fue una erupción volcánica en el sentido habitual, sino la explosión de una caldera de vapor de dimensiones gigantescas. Esto hizo explotar a Krakatoa y las islas cercanas, dejando un hueco detrás de él cuya superficie era de más de 75 km², y entre 200 y 300 metros por debajo del nivel del mar. Donde hubo tierra había ahora mar.

El ser humano es muy pequeño ante estas fuerzas. Y qué sensación causó en Europa que se pudieran comprobar los efectos e incluso ver el polvo de la explosión de una catástrofe que había tenido lugar del otro lado del planeta.

Pasaron más de 70 años. Un profesor sueco, sentado en su mesa de trabajo en el edificio del departamento de radiofísica en el barrio del Hospital Karolinska, en Solna, estudiaba los viejos informes científicos sobre las observaciones realizadas después de la destrucción de Krakatoa. Se había dado cuenta de que quizá se podría aprender de experiencias que hicieran posible prever mejor la manera en que afectarían a Suecia las sustancias radioactivas que en 1954 comenzaron a esparcirse desde las fuertes explosiones atómicas en las Islas Marshall en el Océano Pacífico, aproximadamente a 6000 km al este de Krakatoa, y a una distancia insignificante al oeste-noroeste de la isla Lincoln si esta hubiera existido.

Ese profesor fue un pionero de la radioprotección y tendrá un importante papel en la continuación de mi relato. Después de su muerte fue honrado internacionalmente por sus colegas, que decidieron que la dosis de radiación llevara su nombre.

Y su nombre era Rolf Sievert.

2 | La luz

Y Dios dijo “Hágase la luz” y la luz se hizo. (Primer libro de Moisés 1:3)

Existen cuatro elementos, dijo el filósofo aristocrático Empédocles, nacido en Sicilia quinientos años antes de Cristo. De esa manera tomaba posición en lo relacionado con las concepciones del mundo que habían propuesto los filósofos Heráclitos y Parménides.

— Todo fluye, dijo Heráclito. — Solo el fuego es la materia prima original eternamente viva, que en un constante y continuo cambio conforma todo lo que vemos en la naturaleza.

— Todo está en reposo, afirmó Parménides. - El ente es eterno, el pensamiento es uno con la existencia, todo emana de las contradicciones primarias, la luz y la oscuridad.

— Los contrarios primigenios son fuerzas en lucha, dijo Empédocles. — El amor y el odio, la fuerza que los une y que los separa. Todo está constituido por cuatro elementos: tierra, agua, aire y fuego. El amor los une, el odio los separa.

El fuego y con él la luz, era un elemento dado:

“Y vio Dios que la luz era buena; —y separó Dios la luz de las tinieblas.” (Primer libro de Moisés 1:4)

“Y Dios dijo: “Haya lumbreras en la bóveda del cielo para distinguir el día de la noche, para servir de señales, para las estaciones y para los días y los años. Así sirvan de lumbreras para que alumbrén la tierra desde la bóveda del cielo”. Y así fue” (Primer libro de Moisés 1:14-15)

El sol iluminó y la luna iluminó para que el hombre pudiera ver, y fue “un placer para los ojos”. El ser humano veía, dijo Empédocles, gracias a que el ojo llevaba una chispa de fuego y emitía rayos visuales semejantes a tentáculos.

—Tonterías, afirmó *Aristóteles* (384—322 A.C.) cien años después. — Si fuera así, ¿qué le impediría al hombre ver bien tanto de día como de noche?

El poeta romano *Tito Lucrecio*, nacido cien años antes de Cristo, tenía otra explicación. Él imaginó que de cada superficie de un objeto se lanzaban constantemente partículas, “cortezas”, que contenían información sobre la estructura y apariencia del objeto. Esas cortezas cruzaban el espacio a gran velocidad y daban lugar a una impresión visual cuando llegaban al ojo. Las “cortezas” de Lucrecio no tenían por cierto la forma de corteza de barco sino que se consideraba que eran tan pequeñas que no podían percibirse antes de introducirse en el ojo. El hecho de que pudieran proporcionar una imagen del objeto en su totalidad se debía a que eran lanzadas desde cada parte de la superficie del objeto.

La imagen de Lucrecio referida a las partículas que proporcionaban impresiones visuales tenía su origen en la concepción sobre la constitución de la materia que habían propuesto los filósofos griegos *Anaxágoras* y *Demócrito* (ambos casi contemporáneos de Empédocles). Gracias a que Lucrecio hizo referencia a esas enseñanzas en su influyente poema *De rerum natura* (“Sobre la naturaleza de las cosas”), tenemos la posibilidad de tener una buena idea sobre el contenido de las mismas. Escuchemos a Lucrecio cuando explica la teoría de Anaxágoras sobre la *homeomería* de la materia (citada por el profesor Alfred Liljeström en el Libro de los Inventos, Parte I, pág. 178):

Lo que él define como homeomería es fundamentalmente, por ejemplo, que el hueso está formado por infinitos huesos pequeños y finos, la carne por infinitas carnes pequeñas y finas, la sangre está formada por una cantidad de glóbulos pequeños unidos mutuamente; él se imagina igualmente el oro construido por pequeños granos de oro, la tierra compuesta por partículas de tierra, el fuego por partículas de fuego, el agua por partículas de agua y finalmente entiende que todos los cuerpos están comprendidos por esta manera de construcción. Sin embargo no admite

ningún lugar entre los cuerpos, ya sea en el vacío o el fin de la divisibilidad y en este sentido considero que comparte el mismo error que todos los filósofos que mencioné anteriormente (Heráclito, Empédocles, etc.). Permitaseme agregar que rinde homenaje a principios demasiado frágiles, si es que puede hablarse de principios el proveer a los elementos con la misma naturaleza que la de los cuerpos, de tal modo que estén sometidos al cansancio y la muerte y están protegidos por la nada contra la destrucción.

Lucrecio mostraba más comprensión por las enseñanzas de Demócrito. Según Lucrecio, Demócrito afirmaba que el mundo estaba construido de materia y vacío. La materia, como Anáxagoras afirmó, se divide pero no en un número sin fin de pequeñas partes. Al continuar la división se encuentra finalmente con partículas que no pueden dividirse más y a ellas Demócrito las llamó *átomos* (del griego *atomos*, indivisible). En su intento por explicar lo que es un átomo, Lucrecio dijo:

Pues los mismos átomos que construyen el cielo, el mar, la tierra, los ríos, el sol, dan lugar a las cosechas, los árboles, los seres vivientes pero en diferentes mezclas, combinaciones y movimientos, del mismo modo que tú en todos lados, entre esos versos ves una gran variedad de palabras; y sin embargo puedes ver fácilmente que los versos y las palabras cambian en contenido y sonido. Tal es el poder de las letras, solo mediante la modificación de su orden.

¿No es imponente escuchar esta inteligente explicación y parábola pedagógica de un hombre que vivió hace 2000 años? La teoría de Lucrecio sobre las partículas que llevan impresiones visuales desde los objetos al ojo estableció las bases para la comprensión moderna sobre la luz. No era difícil constatar que tales partículas, al igual que los rayos de una fuente de luz, deben moverse de manera rectilínea. De este principio básico derivaron, poco a poco, un número de leyes ópticas. Los investigadores árabes en particular dedicaron muchos razonamientos perspicaces a las propiedades geométricas de los rayos de luz. Los conocimientos pueden haber sido pocos en tiempos pasados, pero no la capacidad de pensamiento. El famoso físico árabe *Alhacén* (o *Ibn al-Haytham*, 965—aprox. 1040) dice en su obra *Óptica* de alrededor del año 1000 (citado por Liljeström):

Cuando la luz del sol o de la luna o del fuego ingresa en una habitación a través de una pequeña abertura y hay polvo, o el polvo da vueltas a través de la abertura, es visible claramente la luz que entra a través del polvo en el aire y también será visible sobre el suelo o sobre la pared opuesta de la habitación. Y la luz proveniente de la abertura avanza en dirección rectilínea hasta el suelo o hasta la pared opuesta a la abertura. Y en comparación, si uno sostiene un palo recto cerca de esta luz visible, se verá que la luz avanza en la dirección del palo. Si por el contrario, la habitación no tiene polvo, de tal modo que la luz solo se ve sobre el suelo o en la pared opuesta y se coloca el palo rector entre la abertura y la luz visible o entre ellos se tensa un hilo y después se lleva un objeto opaco entre la abertura y la luz, la luz será visible en este objeto opaco pero desaparece del lugar donde se lo veía antes. Si se lleva a este cuerpo opaco hacia adelante y hacia atrás en la dirección paralela al palo, se verá que la luz siempre es visible sobre el cuerpo. Se desprende de ello que es evidente que la luz avanza en trayectorias rectilíneas entre la abertura y el lugar donde aquella es visible.

El carácter exacto de aquello que partía desde un objeto y que daba lugar a una impresión visual en el ojo o de aquello que se lanzaba a través de la abertura e iluminaba objetos en la

habitación continuó siendo un misterio durante mucho tiempo. Sin embargo se suponía desde un primer momento, al igual que lo hizo Lucrecio, que algo se debía lanzar desde las fuentes de luz. Si las “partículas de luz” tenían diferente velocidad en el aire, y en el vidrio, eso explicaría porqué los rayos de luz cambian de dirección, “se interrumpen”, cuando pasan entre medios de diferente densidad óptica. El fenómeno de la refracción de la luz fue descrito cien años antes de Cristo por el astrónomo griego Cleómedes. Él había observado que un rayo de luz que pasa de una sustancia más densa (p.ej. agua) a una menos densa (p. ej., aire) se refractaba en dirección a la interfase. Los rayos de luz desde el objeto en el fondo del lago que llegan al ojo son por ello interpretados como si provinieran de una mayor altura. Por eso el lago aparenta ser menos profundo de lo que realmente es.

El filósofo y matemático francés René Descartes (“Cartesius”, 1596—1650), quien en 1649 llegó a Estocolmo a sugerencia de la reina Kristina (y murió al año siguiente, víctima del frío sueco), intentó encontrar una ley matemática para la refracción de la luz. La relación entre el ángulo de incidencia y el ángulo de emergencia había sido estudiada por Ptolomeo (siglo II D.C.) y por Johannes Kepler (1571—1630) en su libro *Dioptrik* en 1611. El holandés Snellius (en realidad Willebrord van Roijen, 1580—1626) formuló una relación matemática antes que Descartes en 1637; éste publicó la misma fórmula en un estudio con un título poco modesto: *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison et chercher la vérité des sciences. Plus la dioptrique, les météores et la géométrie, qui sont des essais de cette méthode*. Pero Descartes no solo dio la fórmula sino también una explicación.

La fórmula afirma que el cociente entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción es independiente del ángulo de incidencia y constituye una constante que es característica del material⁽¹⁾. Si la luz ingresa en una sustancia desde el vacío (el aire es en este caso una buena aproximación al vacío, en comparación con los líquidos y las sustancias sólidas) se denomina al cociente como *índice de refracción* de la sustancia. La sencilla explicación del fenómeno que dio Descartes era que la luz tenía diferentes velocidades en ambos medios.

Si la luz era una corriente de pequeñas partículas que se movían a diferentes velocidades en diferentes sustancias, la pregunta natural era cuál podía ser esa velocidad. Era evidente que debía ser mucho mayor que la velocidad del sonido. Esta idea había sido considerada por el investigador francés Pierre Gassendi (1592—1655), quien a principios del siglo XVII observó el disparo de un cañón y midió el tiempo transcurrido entre el fognazo y el sonido del disparo. El resultado de su primera medición indicaba que la velocidad del sonido era aproximadamente de 500 metros por segundo. Vincenzo Viviani (1622—1703) y otros investigadores de la Accademia del Cimento (“La Academia Experimental”) en Florencia, repitieron el intento. Calcularon la velocidad del sonido en 352 metros por segundo. Nada mal, ya que el verdadero valor es 340 metros por segundo. ¿Tenía la luz una velocidad que se pudiera medir? Se realizaron un número de experimentos pero sin resultado. No se imaginaba cuán grande podía ser la velocidad de la luz.

Pero aún cuando las condiciones para la medición de la velocidad de la luz parecían estar ausentes en la Tierra, quizá se las podía encontrar en el espacio. El astrónomo danés Ole Römer (1644—1710) observó que las distancias cortas de observación que ofrecía la Tierra quizá no alcanzaban para determinar velocidades muy altas. Arribó a la ingeniosa conclusión de que quizá se podría estimar la velocidad de la luz mediante observaciones desde alguna de las dieciséis lunas de Júpiter. El tiempo de la órbita de la luna de Júpiter podía establecerse

(1) Nota del Revisor: Si la luz incide sobre el material desde un medio diferente al aire o al vacío, el cociente de los ángulos de incidencia y de refracción es una constante que depende de las propiedades de ambos medios

de manera bastante exacta calculado desde el Sol, al observar cuando se oscurecía al pasar por detrás de Júpiter y por consiguiente cuando ya no estaba iluminada.

Tales observaciones podrían realizarse cuando la Tierra se encontraba en su punto más cercano a Júpiter, y cuando Júpiter se encontraba en su punto más alejado de la Tierra.

La diferencia de distancia entre las señales de luz desde la luna de Júpiter sería entonces el diámetro de la órbita terrestre. Römer descubrió que, al parecer, el tiempo de la órbita de las lunas de Júpiter variaba con la distancia entre la Tierra y Júpiter, a pesar de que el tiempo de dicha órbita debía ser considerado como constante. A partir de las observaciones del tiempo, Römer pudo calcular en 1675 la velocidad de la luz en aproximadamente 300.000 kilómetros por segundo. ¡Bien hecho, ya que hoy consideramos que la velocidad de la luz en el vacío es de 299.792 kilómetros por segundo!

La luz se mueve increíblemente rápido a través del aire y el vacío pero ¿se mueve más rápido o más despacio en sustancias más densas? Ésta sería una pregunta que se debatiría durante mucho tiempo, ya que no era fácil realizar esas mediciones en la Tierra. Y la pregunta era polémica.

Descartes suponía que las partículas de luz que pasan por una interfase entre dos medios, conservan su componente de velocidad en dirección tangencial inalterada pero cambia el componente de velocidad perpendicular a la superficie. Para que esa teoría fuera correcta era necesario que la velocidad de la luz en, por ejemplo, el agua, fuera mayor que en el aire, ya que el índice de refracción del agua es mayor que uno.

El matemático francés *Pierre de Fermat* (1601–1665) tenía otra teoría. Él afirmaba que las partículas de luz eligen el camino que las lleva más rápidamente hasta el objeto (“Principio de Fermat”). Para que esto fuera correcto, la velocidad de la luz debía ser menor en el agua que en el aire. ¿Quién tenía razón, Descartes o Fermat?

Era una pregunta que todavía no tenía respuesta cuando *Isaac Newton* (1643–1727) estudió las leyes de la óptica a fines del siglo XVII. Todas las partículas de luz no podían ser idénticas, afirmaba Newton. Cuando la luz se refractaba en un prisma se podía obtener un espectro de colores. Newton supuso que eso se debía a que las partículas de luz eran de diferentes tipos y tenían diferentes velocidades y por eso se refractaban de manera distinta. Pero si esto era así, las partículas de luz que respondían a diferentes colores se encontraban desde el comienzo en la luz “blanca” común, antes de alcanzar al prisma.

En esa época esta conclusión no era algo evidente. Que la luz blanca del sol se refractara en prismas, de tal modo que los diferentes colores se pudieran comprobar en los diferentes ángulos de refracción, era una observación muy antigua. También era sabido que el mismo fenómeno se producía al aparecer el arcoíris: Un espectro tenía “todos los colores del arcoíris”. El monje dominico polaco *Vitello* demostró en su escrito *Optik* en el siglo XIII que el arcoíris aparece gracias a que las gotas de agua no solo reflejan sino que también refractan la luz solar. En el siglo XVII Descartes había debatido sobre la creación del arcoíris en detalle, y era plenamente consciente acerca de que la luz de diferentes colores se refractaba en un prisma, al igual que la luz de diferentes colores procede de la luz blanca en la primera refracción. Pero Descartes consideraba, razonablemente, que los diferentes colores no existían antes de la primera refracción sino que eran creados recién en ese momento. Newton, por su parte, afirmaba que las partículas que creaban a los diferentes colores existían allí, pero que el “color” no era una propiedad de la luz sino que era, en su lugar, una impresión visual del observador. La impresión visual “blanco” era algo que los rayos tenían la capacidad de crear solo de manera conjunta. Newton escribió (según Liljeström):

Cuando hablo de los rayos de luz como el color o rayos de colores, no es de manera científica y no puede ser entendido en un sentido estricto sino como una expresión popular común, similar a la noción que la gente tiene, a la vista de estos experimentos. Porque, en rigor, los rayos de luz no están coloreados. En ellos no hay más que cierta fuerza o capacidad de provocar una impresión de uno u otro color.

Newton defendía la *teoría de la emisión*, según la cual la luz se propaga por alguna clase de partículas. Cuando Newton comenzó a experimentar con la refracción de la luz en 1666, Römer todavía no había establecido la velocidad de la luz y Newton no era todavía una gran autoridad en este tema. Pero cuando resumió en 1704 sus descubrimientos ópticos en su gran trabajo *Opticks; or a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light*, ya había publicado mucho tiempo atrás su *Principia* y también había explicado el movimiento de los cuerpos celestes. Para ese entonces su palabra era muy respetada. En su óptica planteó definitivamente la Teoría de la Emisión.

Con la ayuda de la Teoría de la Emisión, Newton logró explicar todos los fenómenos ópticos conocidos de la época y la teoría fue aceptada como válida durante muchos tiempo. Esa teoría se contradecía, sin embargo, con el Principio de Fermat. Establecer cuál era la teoría correcta era algo que se resolvería mediante experimentos que hasta entonces eran imposibles de realizar.

Recién en 1850 pudo alguien realizar tal proeza. Logró hacerlo el francés *Léon Foucault* (1819—1868), más conocido por sus intentos por demostrar la rotación de la Tierra con ayuda de un péndulo de 64 metros colgado de la cúpula del Panteón de París. Foucault utilizó una teoría que el año anterior había sido desarrollada por su compatriota *Hippolyte Fizeau* (1819—1896) en las primeras determinaciones terrestres de la velocidad de la luz en el aire.

El método de Fizeau era sagaz. Con la ayuda de espejos emitió el mismo haz de luz dos veces hacia la corona dentada de un engranaje que rotaba rápidamente.

Entre los dos pasajes, el rayo de luz era enviado a lo largo de un trayecto tan largo como fuera posible en el terreno, y se volvía a reflejar en un espejo. Si el engranaje rotaba lo suficientemente rápido, podía suceder lo siguiente: La luz que dejaba pasar en el intervalo entre los dos dientes volvía a la corona justo cuando ésta había girado lo suficiente como para que un diente cortara el pasaje.

Si se conocía la cantidad de dientes, la velocidad de rotación del engranaje y la distancia que la luz había recorrido, se podría calcular la velocidad de la luz.

Foucault modificó el método junto con Fizeau, reemplazando el engranaje con un sistema que utilizaba un espejo rotativo que se movía rápidamente. Pudo así utilizar distancias más cortas. Los intentos que se realizaron para comparar las velocidades de la luz en el aire y en el agua demostraron que la velocidad de la luz en el agua es de solo $3/4$ la velocidad de la luz en el aire. Para que Descartes y Newton tuvieran razón, la relación debía haber sido de $4/3$. El resultado de Foucault fue un duro golpe contra la Teoría de la Emisión.

Ésta había tenido durante mucho tiempo un competidor en la teoría de que la luz era una ondulación: la *Teoría de la Ondulación* (compárese con la "ondulación" del pelo), la cual suponía que el aire, el espacio sideral y los intervalos entre las partes de la materia estaban rellenos por una sustancia que mediante oscilaciones mecánico-elásticas podía propagar la luz. Es decir que la luz podría difundirse mediante ondulaciones en esta sustancia, al igual que el sonido lo hace en el aire u otra materia.

La existencia de esta sustancia invisible omnipresente fue propuesta por el holandés *Christiaan Huygens* (1629—1695) en un comunicado a la Academia de Ciencias francesa en 1678,

creada doce años antes. Sin embargo, la teoría de Huygens fue publicada recién en 1690 en su *Traité de la lumière* (“Tratado sobre la luz”). En ese tratado Huygens denominó “éter” a la sustancia portadora de ondulaciones, llamada así por la palabra griega que define al aire claro que se encuentra sobre las nubes, *aither*.

Si se suponía que la luz era una ondulación en el éter, se arribaría fácilmente a las leyes de refracción, en consonancia con el principio de Fermat. Era un fuerte apoyo a la Teoría de la Ondulación. Sin embargo la palabra de Newton tenía gran autoridad, la suficiente para que la teoría de la emisión, o Teoría de la Emanación, como también se la denominaba, dominara durante todo el siglo XVIII.

Pero también se elevaban voces escépticas. El eminente matemático suizo *Leonhard Euler* (1707–1783) escribió a comienzos de la década de 1760, en una carta a la princesa prusiana de Anhalt-Dessau, las siguientes palabras escépticas (citadas por Liljeström):

Por más extraño que Su Majestad considere al pensamiento de Newton, es decir, que los rayos del sol provienen de una emanación real, éste ha llegado a ganar tanto apoyo, que casi nadie se atreve a dudar de ella. Lo que más ha contribuido a esta empresa es, sin duda, la gran autoridad de este distinguido pensador inglés, que fue el primero en descubrir las verdaderas leyes del movimiento de los cuerpos celestes. Sin embargo, este descubrimiento le ha llevado a la teoría de la emanación. Cartesius se vio obligado a llenar los cielos con una materia pura para apoyar su teoría, y a través de esta materia los cuerpos celestes se mueven libremente. Pero se sabe que si un cuerpo se mueve en el aire, genera una resistencia. De allí Newton extrae la conclusión de que por más pura que sea esa sustancia celestial, los planetas deben encontrar alguna resistencia en su movimiento. Pero, dice él, este movimiento no está expuesto a resistencia alguna, y de allí deduce que el inmenso espacio celestial no contiene materia alguna.

En todas partes hay por lo tanto, un vacío total, y éste es uno de los dogmas fundamentales de la filosofía de Newton: que la inmensidad del universo no contiene materia alguna en los espacios existentes entre los cuerpos celestes. En consecuencia, existe desde el sol y hasta nosotros, o, mejor dicho, hasta la atmósfera de la Tierra, un vacío total. Pero si el espacio entre el Sol y la Tierra está completamente vacío, es imposible que los rayos de luz lleguen a nosotros a través de tal mediación, como cuando el sonido de una campana llega a nosotros a través del aire, de modo que si el aire entre nosotros y el reloj se ha eliminado, nada se escucha, por más que se haga sonar la campana con fuerza.

Puesto que de esta manera se ha establecido que hay un espacio completamente vacío entre los cuerpos celestes, no se puede incluir ninguna otra concepción que no sea la teoría de la emanación, y esta razón ha obligado a Newton a sostener que el sol y también todos los cuerpos luminosos emiten rayos reales y que esos rayos consisten en partes del cuerpo luminoso, que son lanzados por una fuerza tremenda. Se necesita en verdad una tremenda fuerza para darle a estos rayos una velocidad incomprensible, tal que en 8 minutos viajen desde el Sol a la Tierra.

Pero veamos, si esta explicación es consistente con las perspectivas fundamentales de Newton, según la cual existe un vacío total en el cielo, de modo que los planetas no encuentren resistencia alguna,. Su Alteza comprenderá fácilmente que el espacio celestial, en lugar de permanecer vacío, está completamente lleno de rayos, no sólo del sol sino también de todas las otras estrellas, cuyos rayos cruzan sus partes con la mayor velocidad y en todas las direcciones. Los cuerpos celestes que pasan a través de este espacio, en lugar de encontrarse en el vacío se encontrarían con materia de los rayos luminosos en la más terrible agitación por lo que los cuerpos estarían más perturba-

dos por su movimiento que si esta materia estuviera en reposo.

Newton, que temía que esa materia libre perturbara el movimiento de los planetas (tal como Cartesius supuso) , estaría en total contradicción con su verdadera intención de introducir un medio aún más extraño, porque a través de este medio los planetas deberían estar expuestos a perturbaciones infinitamente mayores. Vea Ud. un triste ejemplo de la sabiduría humana, que con el fin de evitar un inconveniente, a menudo genera mayores molestias.

Esto le escribía Euler a la princesa en su carta 18. En su carta 26 continúa explicando la semejanza entre la luz y las ondas sonoras:

Los objetos visibles deberían ser comparados con los instrumentos musicales que se tocan o que ya suenan. Es indiferente que sea a través de una fuerza natural o si son tocados por fuerzas desconocidas, pues mi propósito es que suenen y produzcan sonidos. Los objetos que no son autoluminosos, estén o no iluminados, podrían asemejarse a instrumentos musicales que no se utilizan o aquel cuyas tensas cuerdas no dan sonido alguno. Si luego trasladamos nuestra pregunta del campo de la luz al del sonido, se simplifica a lo siguiente: si una cuerda en reposo es sometida a un sonido desde un instrumento musical, ¿realizará entonces algún movimiento, incluso si no se toca? La experiencia nos dice que este hecho en realidad tiene lugar.

La princesa prusiana tenía la ventaja de tener, gracias a las cartas de Euler, un buen puesto de observación acerca de los adelantos de la ciencia y del pensamiento . En su carta 28, Euler los resume de la siguiente manera:

La ignorancia sobre la verdadera naturaleza de los colores siempre ha dado lugar a grandes controversias entre los filósofos. Cada uno de ellos ha hecho un esfuerzo para brillar con alguna opinión particular sobre este tema. La idea de que el color está en los objetos mismos es demasiado simple y no muy digna de un filósofo, que siempre debe elevarse por encima del hombre común. Puesto que el campesino imagina que un cuerpo es de color rojo, otro azul y otro verde, un filósofo no puede diferenciarse negándolo. Por eso afirma que los colores no son nada en realidad, no están en los objetos a los que hace referencia. Los newtonianos colocan a los colores exclusivamente en los rayos de luz, que distinguen en los colores rojo, amarillo, verde, azul, violeta, y se dice que un objeto se ve de tal o cual color, ya que refleja rayos de este tipo. Otros, que opinan que esta visión parece demasiado dura, dicen que los colores sólo existen en nuestra imaginación. Esta es la mejor manera de ocultar su ignorancia, para que la gente no crea que un estudiante sabe menos sobre la naturaleza de los colores que ellos. Pero si hoy escuchamos a los eruditos hablar así, se tiene la sensación de que están en posesión de los misterios más profundos, a pesar de que no saben más que un campesino, tal vez menos. Su Alteza comprenderá fácilmente que estos detalles aparentes son solo argucias. Cada color (para distinguirlos de los colores compuestos) está relacionado con un cierto número de vibraciones por unidad de tiempo, de modo que un cierto número de vibraciones ejecutado en un segundo determina el color rojo, otro el amarillo, otro el verde, otro el azul y otro el violeta, que son los colores básicos que el arcoíris muestra. Por lo tanto, si las partículas en la superficie de un objeto están constituidas de tal manera que cuando se agitan realizan en un segundo tantas vibraciones como las que exige el color rojo, entonces llamaré a este cuerpo "rojo", como el campesino, y no encuentro ninguna razón para apartarse de esta palabras consagradas por el tiempo. Esto no impide que los rayos de luz que tengan el mismo número de oscilaciones por segundo, también puedan ser llamados, con el mismo derecho, rojos. Cuando finalmente los nervios

en el fondo del ojo se ven afectados por estos rayos y se los aprecia el mismo número de veces por segundo, da la impresión sensorial del color rojo. De esta manera quedará claro, que no encuentro ninguna razón para introducir términos oscuros y misteriosos, que básicamente no conducen a nada. La correspondencia entre el sonido y la luz es tan completa que incluso se lleva a cabo hasta en el mínimo detalle.

Esto fue escrito en 1762, mientras todavía reinaba la Teoría de la Emisión. Es notable que Euler, sin atreverse a hablar de ondulaciones, consideraba, sin embargo que las partículas de luz se caracterizaban por *frecuencias* determinadas. De esta manera se aproximaba mucho al modo de enfoque moderno.

Cuando luego se aceptó más el hecho de considerar a la luz como una ondulación, se comenzó a hablar en primer lugar de la "*longitud de onda*", a pesar de que la frecuencia brindaba una mejor descripción (tal como escribió Euler a la princesa).

Cada ondulación, sean olas en el mar, ondas de sonido en el aire o, como luego se vería ondas de luz, puede ser descripta con ayuda de la frecuencia (f) y la longitud de onda (λ). El producto de las dos será la velocidad de onda ("v" por la palabra inglesa "velocity"):

$$f \cdot \lambda = v \quad (2.1)$$

Para las ondas de sonido en el aire será $v = 340$ metros por segundo. La nota musical "*la*" tiene aproximadamente 440 oscilaciones por segundo y por ello la longitud de onda será $\lambda = 340/440 = 0,773$ metros, algo que debe saber el fabricante de órganos. La velocidad de la luz suele indicarse con $c = 3 \cdot 10^8$ metros por segundo (300.000 kilómetros por segundo).

La longitud de onda es la distancia entre dos crestas consecutivas de la onda.

Esto es fácil de comprender cuando analizamos ondulaciones mecánicas *transversales*, en las que el movimiento de oscilación en el medio que transmite la onda es perpendicular a la dirección de propagación de la misma.

Las verdaderas ondulaciones mecánicas transversales solo pueden tener lugar en cuerpos sólidos. Las olas sobre la superficie del agua se asemejan, sin embargo a una ondulación transversal. Es la ondulación y no el agua lo que se mueve hacia adelante, pero cada partícula de agua describe una órbita circular. Sin embargo se puede diferenciar entre crestas y valles y de esa manera estimar una longitud de onda.

No es tan sencillo observar longitudes de onda en una ondulación mecánica *longitudinal*. La misma también puede tener lugar en líquidos y gases e implica que las partículas del medio que transmite la onda se mueven paralelamente a la dirección de propagación de la misma, lo que da motivo a una serie de incrementos y disminuciones de presión alternativamente. Cuando una fuente de ondulación oscila con una frecuencia constante, la longitud de onda (en el aire por ejemplo) será la distancia entre dos zonas consecutivas con la misma presión máxima (o presión mínima). Cuando el sonido de una cuerda de violín que oscila llega a nosotros a través del aire, se tienen ondulaciones longitudinales que llevan los cambios de presión a nuestro oído y ponen en movimiento receptores de tal modo que recibimos la impresión de un sonido.

La objeción primaria contra la Teoría de la Ondulación para la propagación de la luz fue que exigía un medio que pudiera vibrar más o menos transversalmente o, como en el caso del sonido a través del aire, pudiera transmitir cambios de presión. No se había podido demostrar la existencia de un medio como el descrito (es decir, un "éter") y también era difícil imaginárselo.

Pero Newton vio también otras dificultades. Se podía refractar la luz con ayuda de un espejo ustorio y mostrar que la luz acumulada llevaba consigo calor. Con la Teoría de la Emanación no era difícil comprender que un bombardeo con multitudes de partículas de luz pudiera tener tal efecto. Pero ¿una ondulación?

Y si la luz fuese una ondulación, al igual que el sonido, ¿no debería propagarse y dar la vuelta a la esquina como el sonido? No, los rayos de luz deben estar compuestos por pequeños cuerpos que se emiten desde las sustancias luminosas, “ya que esos cuerpos deben propagarse en un medio uniforme y avanzar en línea recta sin que se curven en la sombra, de conformidad con la naturaleza de la luz”.

En la “Pregunta 29” de su *Opticks* dice Newton (según Liljeström):

Para obtener todas las diferencias en color y grado de refractividad solo es necesario suponer que los rayos de luz están compuestos por cuerpos de diferente tamaño, de los cuales los más pequeños dan lugar a la luz de color violeta, el más débil y oscuro de todos los colores, y que también es el más fácil de ser desviado de su camino recto por las superficies refractarias. Los otros, a medida que son mayores, generan los colores más fuertes y luminosos, azul, verde, amarillo y rojo, más difíciles de ser desviados.

Pero Newton estaba equivocado cuando creyó que la luz, al igual que el sonido, podía doblar en las esquinas. No había comprendido las observaciones realizadas por un maestro del colegio jesuita de Bologna, *Francesco Maria Grimaldi* (1618–1663). En 1665, en su trabajo póstumo *Physico-mathesis de lumine, coloris iride*, Grimaldi daba cuenta de los experimentos en los que había observado la luz que pasa a través de un pequeño agujero de una pantalla y que luego generaba una superficie circular de luz en una pared detrás de la pantalla. Si él introducía una aguja en el haz de luz no se veía lo que uno hubiera esperado, es decir, una sombra nítida de la aguja sobre la superficie iluminada, sino una serie de rayos más oscuros y más claros que hacían que la sombra fuera más ancha de lo esperado. Grimaldi pensó que la explicación era la curvatura de la luz, la *difracción*, y no descartó que ello significara que la luz era una ondulación. *Leonardo da Vinci* (1452–1519) había realizado observaciones semejantes sobre la estructura de los bordes de las sombras, ya a fines del siglo XV.

Para la Teoría de la Emanación, durante el siglo XVIII, era embarazoso que esta curvatura de la luz, que tan fácilmente se podía constatar, no pudiera explicarse. En 1818 la Academia de Ciencia francesa organizó un concurso cuyo tema era la curvatura de la luz. Uno de las aportaciones al concurso fue redactada por un ingeniero de 30 años llamado *Augustin Fresnel* (1788–1827). Contrariamente a las reglas del concurso, él partió de la base de que la luz era una ondulación y dio una detallada explicación del fenómeno de curvatura, como así también de que la luz en general parece propagarse de manera rectilínea. Y lo mejor de todo: su explicación podía demostrarse fácilmente mediante un experimento. Y así fue. La teoría de Fresnel demostró ser sustentable. Ahora había un fenómeno que la Teoría de la Ondulación, y no la Teoría de la Emanación, podía explicar.

Sin embargo, algunos otros fenómenos siguieron siendo inexplicables, entre otros, la polarización de la luz. Ya en 1669 el médico danés *Rasmus Bartholin* (“Erasmus Bartholinus”, 1625–1698) describió las notables propiedades de una forma transparente de calcita, llamada “islandsspat” o calcita de Islandia. Si uno observa un objeto mediante un cristal de calcita de Islandia, verá dos imágenes debido a la capacidad del cristal de refractar la luz de dos maneras diferentes. Uno de los sustentos más firmes de la Teoría de la Ondulación había sido estable-

cido por Huygens, quien ya había podido explicar la doble refracción de la calcita mediante la concepción de la luz como una ondulación. Sin embargo no había logrado explicar porqué la doble refracción no tenía lugar en otro cristal de calcita que estaba situado de manera paralela al primero. El físico francés y oficial de artillería *Étienne Louis Malus* (1775–1812) observó luego, a comienzos del siglo XIX, que ciertos objetos no se reproducían de manera doble a través de un cristal de calcita. Descubrió que si los rayos de luz se reflejaban contra un vidrio con un ángulo menor a 55° , perdían las propiedades de doble refracción.

Con la concepción de Huygens sobre la luz como una ondulación no era posible imaginarse ondas con propiedades tales que su capacidad de refractar fuera afectada por la posición de las sustancias refractarias en el espacio. Huygens consideró a la luz como una onda de presión longitudinal, al igual que el sonido. Tal onda se caracteriza sólo por su frecuencia, intensidad y dirección y se supone que todas las partículas que vibran reciben impulsos en la dirección de propagación de la onda.

Huygens no tenía idea de que las ondas de luz podían describirse como ondas transversales, es decir, llevadas por un medio que vibra perpendicularmente a la dirección de propagación de la onda, más o menos como las olas sobre la superficie del agua.

Una onda mecánica transversal verdadera, por ejemplo, la onda estacionaria en una cuerda que vibra, puede suponerse que está compuesta por ondulaciones horizontales, pero alternativamente también por ondulaciones verticales.

Si la luz fuera una ondulación transversal existiría la posibilidad de oscilaciones en todas las direcciones rectilíneas imaginables y perpendiculares a la dirección de propagación de la onda. Sería posible, afirmaba Malus, que la luz en su reflexión contra un vidrio o en la refracción en un cristal de calcita, perdiera todas las direcciones rectilíneas de oscilación, excepto las situadas en un solo plano.⁽²⁾ Propuso que la luz que tuviera esas propiedades se llamara polarizada.⁽³⁾ La luz había obtenido una determinada relación con el entorno y se refractaría de manera diferente en un cristal de calcita, según la posición del cristal en relación con el plano de oscilación de la luz.

La comprobación de la polarización de la luz hacía que su ondulación fuera aún más difícil de comprender. Si la ondulación era transversal en lugar de longitudinal, no podría propagarse a través de gases o líquidos (las olas transversales sobre la superficie del agua no constituyen una ondulación a través del agua sino que están compuestas por cambios de estado de la superficie de la misma). Si la luz fuera una ondulación transversal, se debería suponer que se propaga a través de oscilaciones en un cuerpo sólido elástico. Que el éter sea un cuerpo sólido se contradice con el sentido común. Había que satisfacerse con la constatación de que la luz a veces actuaba *como si estuviera* polarizada.

Si la luz fuera una ondulación, las diferentes ondas de luz deberían influirse mutuamente, a veces fortaleciéndose unas a otras y a veces hasta anulándose mutuamente, al igual que las olas sobre una superficie de agua. Tal cooperación entre las ondas de luz fue descrita de la siguiente manera en 1801 por el genio universal inglés *Thomas Young* (1773–1829), el mismo que resolvió el misterio de la piedra Roseta para que Champollion lograra descifrar los jeroglíficos (citado por Liljeström):

Supongamos que un número de olas se mueven a la misma velocidad en un lago estancado y penetran en un canal que desemboca fuera del mismo. Supongamos también que por otra razón semejante se generó otra serie de olas similares que llegan al canal a la misma velocidad que las

(2) Nota del Revisor: Un sólo plano para la intensidad de campo eléctrico E y un solo plano para la intensidad de campo magnético H

(3) Nota del Revisor: Hoy en día este tipo de polarización se denomina polarización lineal.

anteriores. Una serie de olas no va a destruir a la otra, pero sus efectos se combinan. Si ingresan en el canal de tal modo que las crestas de una coincidan con las de la otra, entonces ambas darán lugar a una serie aún mayor de crestas, pero si una de las series de crestas sucede a las de la otra, de modo tal que las crestas de una coincidan con los valles de la otra, se llenarán exactamente esos valles y la superficie del agua se mantendrá uniforme, o al menos yo no puedo hallar ninguna otra salida, ya sea teórica o experimental. Ahora afirmo que semejantes efectos tienen lugar tan pronto como se mezclan dos cantidades de luz y a esto llamo yo Ley General acerca de la *Interferencia* de la luz.

Esta afirmación coincidía con las observaciones que el profesor jesuita Grimaldi había realizado 150 años antes. En su trabajo póstumo "Proposition XXII" se hace una afirmación sensacional: "Un objeto iluminado se puede oscurecer si se suministra más luz a la luz que lo ilumina."

Cuando Grimaldi estudiaba la curvatura de la luz detrás de un pequeño orificio en un disco, había hecho una interesante observación. La mancha de luz que se lograba sobre una pared alejada del orificio no era necesariamente más clara si se encontraba con otra mancha de luz semejante desde un orificio cercano. Se podía esperar que la luz más la luz amplificara la mancha, pero en realidad Grimaldi descubrió que la luz más la luz también podía generar oscuridad. Fue un ejemplo de la tesis formulada mucho más tarde por Young sobre la interferencia de la luz. Young demostró en sus *Lectures on Natural Philosophy*, en 1807, que se podía comprobar fácilmente la interferencia al realizar dos cortes paralelos con un cuchillo afilado en una pantalla. Si luego se ilumina la pantalla desde uno de los lados y se coloca otra pantalla en una habitación oscura detrás de las aberturas, se verán en la segunda pantalla rayos oscuros y claros alternativamente. Young podía explicar esto fácilmente afirmando que las ondas de luz entrantes, después del pasaje a través de las aberturas, se habían ensanchado, como si cada una de las aberturas hubiera sido una fuente de ondas. A través de esta propagación de la luz, la pantalla que está detrás es iluminada al recibir las ondas de luz desde cada abertura. Sin embargo la luz tiene diferentes trayectorias para dirigirse a las diferentes partes de la pantalla y surge una diferencia de trayectorias de la luz desde ambas aberturas, excepto en los puntos de la pantalla que se encuentran en el centro de la línea divisoria entre las aberturas.

A veces la diferencia de trayectorias hace que las ondas amplifiquen el efecto de manera recíproca, y en otras ocasiones lo amortiguen mutuamente. Por eso se obtienen rayos oscuros y claros de manera alternativa sobre la pantalla.

Si la luz incidente es blanca, los rayos que representan a los diferentes colores se intercalan entre sí, ya que los componentes de luz de los diferentes colores tienen diferentes longitudes de onda.

A comienzos del siglo XIX, Thomas Young podía describir la luz como una ondulación y así explicaba fenómenos tales como la difracción y la interferencia. Pero para que su explicación fuese sustentable, la luz debía ser una ondulación transversal, lo cual suponía que todo el universo estaba lleno de un medio sólido, elástico, "el éter", que podía transportar las ondas. Esto parecía absurdo y la naturaleza de la ondulación era, por ello, todavía desconocida. Habría que esperar hasta la década de 1880 antes de comprender la relación entre la luz y los fenómenos de la electricidad y el magnetismo, poco investigados hasta entonces.

3 | Electricidad y magnetismo

La electricidad es conocida desde la antigüedad. Tales de Mileto (640—550 A.C.) había descrito cómo el ámbar, al frotarlo, tenía la extraña capacidad de atraer cuerpos livianos tales como plumas y el plumón. Tales consideró esto como una prueba para la observación hilezoista de que la materia está viva y poseída por demonios. Se convenció aún más cuando experimentó luego con piedras magnéticas.

En 191 A.C. *Antioco III* (llamado también *Megas*, es decir, “El Grande”) fue derrotado por los romanos en las Termópilas. Un año después fue definitivamente vencido en Magnesia y debió abandonar grandes extensiones de Asia Menor, inclusive yacimientos minerales con mineral de hierro negro (ferroferita, $\text{Fe}(\text{FeO}_2)_2$) del mismo tipo que el de las minas de hierro suecas. Denominó a ese material piedra *Heracleia* (*Lithos herakleia*), ya que la ciudad de Magnesia se llamaba anteriormente Heracleia. Después se utilizó el término “magnetita” para denominar al mineral de hierro, por el nuevo nombre de la ciudad. Es por eso que se denomina “magnetismo” a la propiedad del mineral de hierro de atraer objetos ferrosos. Si Heracleia nunca hubiese cambiado de nombre, quizá llamaríamos “heracleios” a los imanes.

La capacidad de la fuerza magnética de “contagiar” y convertir en magnética a una aguja al frotarla contra un trozo de magnetita ya era conocida por los chinos mucho antes del nacimiento de Cristo. Ellos sabían también que esa aguja siempre se orientaba en dirección norte-sur si se permitía que girara libremente. Los chinos conocían la *brújula*, y se sabe que la utilizaban en sus barcos ya por el siglo IV. Su uso se extendió hasta los navegantes árabes en el Océano Índico y de los árabes a los venecianos. En Europa el uso de la brújula entre los navegantes del siglo XII es mencionada entre otros por *Alexander Reckams* en su libro “Sobre la naturaleza de las cosas” (*De naturis rerum*).

Cristóbal Colón (1451—1506) navegó con la brújula y su equipo incluía un número extra de agujas para brújulas y una piedra magnética para imantarlas. Durante su gran viaje en 1492 descubrió también la declinación magnética.

Pero el verdadero pionero en el estudio científico de la electricidad y el magnetismo fue el médico de la corte de la reina Elisabet I, *William Gilbert* (1544—1603). Él descubrió que muchas sustancias, además del ámbar (el diamante, el azufre, la resina, etc), tenían la capacidad de atraer a objetos livianos después de frotarlos, pero que los metales carecían de esa propiedad a pesar de que se podía imantar a un par de ellos, tales como el hierro y el níquel. Gilbert había establecido una diferencia entre los que hoy llamamos aislantes y conductores eléctricos.

Gilbert comprendió que las fuerzas magnéticas eran de una naturaleza diferente a la fuerza que ejerce el ámbar luego de ser frotado. Por eso denominó *vis eléctrica* a esta segunda fuerza en honor al nombre griego del ámbar *e'lektron*, creando así la palabra “electricidad”.

En su gran obra *De magnete, magneticisque corporis, et de magno magnete tellure* (“Sobre el imán y los cuerpos magnéticos y sobre el gran imán, la Tierra”) Gilbert describió en 1600 a la Tierra como un gran imán. De los cientos de capítulos del libro dedicó sin embargo solo uno al fenómeno eléctrico: el magnetismo era la cuestión más candente de entonces.

Ya en 1269 el francés *Petrus de Maricourt*, comúnmente llamado El Peregrino, describió cómo la acción de fuerza del imán parece provenir de dos polos que, pensando en las propiedades de la brújula, podrían denominarse “polo norte” y “polo sur”. El peregrino demostró que los polos iguales se rechazan (es decir, norte-norte o sur-sur) mientras que los polos diferentes (norte-sur) se atraen.

En 1733 el superintendente del Jardín des Plantes durante el reinado de Luis XV, el físico Charles François de Cisternay du Fay (1698—1739), también llamado Dufay, descubrió que existen dos tipos de electricidad. Las denominó carga vítrea y carga resinosa, por los materiales que debían

ser frotados para generar las fuerzas eléctricas. Descubrió que los tipos de electricidad iguales se rechazaban pero si los cuerpos tenían diferente tipo de electricidad se atraían.

En 1785 los efectos de las fuerzas eléctricas y magnéticas fueron detallados mediante una descripción matemática sencilla por el oficial de ingeniería francés *Charles de Coulomb* (1736—1806). Él pudo demostrar que la fuerza (F) que actúa entre dos cuerpos cargados eléctricamente o entre dos polos magnéticos es directamente proporcional a la cantidad (Q) de electricidad o magnetismo en cada uno de los cuerpos⁽¹⁾, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia (r) entre los cuerpos:⁽²⁾

$$F = k \cdot Q_1 \cdot Q_2 / r^2 \quad (3.1)$$

donde la constante de proporcionalidad⁽³⁾ k tiene el valor 9.109 N.m² / (A·s)² para que, con las cargas indicadas en coulomb (C) o ampere - segundo (A·s) y la distancia en metros, F esté indicado en newton (N). Esta ley demostró ser análoga a la fórmula de Newton de 1687 para la fuerza de gravitación entre dos planetas, si Q1 y Q2 son las masas de los planetas a una distancia r uno del otro.

No solo la fuerza de gravitación sino también las fuerzas eléctricas y magnéticas podían describirse ahora con la misma fórmula. Pero el hecho de que las fuerzas pudieran actuar a distancia en el vacío era igualmente notable en los tres casos. Habían muchas propuestas para explicarlo, pero ninguna era especialmente convincente.

El romano Tito Lucrecio, citado en el capítulo anterior, supuso en su escrito *De la naturaleza de las cosas* (*De rerum natura*) que la luz estaba compuesta por “cortezas” que permanentemente emanaban hacia el ojo desde la superficie del objeto. Del mismo modo supuso que existía un flujo de “semillas” magnéticas que salían de la piedra magnética y que describió (según Liljeström) “que desplazan el aire entre la piedra y el hierro mediante descargas repetidas. Cuando este vacío entre la piedra y el trozo de hierro se ha liberado, las partes pequeñas del hierro van a entrar en el vacío, en el cual se precipitan con gran intensidad. Pero debido a esto se concluye que todo el trozo de hierro está en movimiento con toda su masa, ya que no hay cuerpo, cuyas partes están unidas y fijadas entre sí, como el hierro frío y sólido. Por eso no es sorprendente que ninguna molécula de hierro pueda volar en el vacío, sino que vuela todo el trozo de hierro.”

Descartes continuó desarrollando durante el siglo XVII la teoría de Lucrecio, y consideraba al imán más como un dispositivo que absorbía partículas en un extremo y las expulsaba en el otro. Dentro del imán las partículas brotaban en un número de tubos paralelos. Los imanes podían asemejarse a un conjunto de pajitas para absorber líquidos. Fuera del imán los tubos se ensanchaban hasta ser tubos de flujo con mayor sección transversal, pero el número de partículas que brotaban de cada tubo era probablemente el mismo.

En sus cartas a la princesa de Anhalt-Dessau, Euler demostró que la magnitud del efecto de la fuerza magnética dependía de si el flujo magnético estaba concentrado, como en los polos magnéticos, o disperso como a cierta distancia del imán. Cuanto más “tubos de flujo” por unidad de superficie existieran por donde el flujo avanzaba, mayor debería ser el efecto de la fuerza, ya que más partículas encontraban una superficie dada, en el camino del flujo.

El efecto de la fuerza entre cargas eléctricas o polos magnéticos era una prueba evidente para demostrar que un cuerpo era eléctrico o magnético. El hecho de que otros cuerpos pudiesen ser

(1) Nota del Revisor: ...o polos magnéticos,...

(2) El químico inglés Henry Cavendish (1731—1810) parece haber realizado el mismo descubrimiento 14 años antes que Coulomb, pero no lo había publicado.

(3) Nota del Revisor: La constante de proporcionalidad para el caso del magnetismo vale: $k = 10^{-7} \cdot N \cdot A^{-2}$

atraídos, por ejemplo un plumón sin que fuera eléctrico o un trozo de hierro sin que fuera magnético podía explicarse afirmando que se volvieron eléctricos o magnéticos por “influencia”.

Con la ayuda de la fórmula de Coulomb (3.1) es posible calcular la fuerza (E)⁽⁴⁾ que a una distancia r de una carga eléctrica de Q ampere-segundo (A·s) actuase sobre un cuerpo con una unidad de carga (1 A·s). La fuerza será

$$E = k \cdot Q / r^2 \quad (3.2)^{(5)}$$

Con el valor de la constante de proporcionalidad k que se indica en (3.1) la fuerza se expresa en newton (N). Puesto que esa acción de la fuerza se encuentra en todos lados en el espacio, se dice que allí existe un “campo eléctrico” y que la fuerza es la intensidad de campo eléctrico E.⁽⁶⁾ Muchas cosas han pasado con las cantidades y unidades físicas desde la época de Coulomb y luego veremos que la intensidad de campo eléctrico se indica actualmente en voltios por metro.

La intensidad de campo eléctrico (dependiendo de qué cargas eléctricas existan alrededor) es, por consiguiente, en cada punto, la fuerza que influiría en un hipotético cuerpo con determinada carga unitaria⁵⁾, si ésta estuviera allí. En tanto el cuerpo hipotético no exista no se ejerce ningún efecto de fuerza y la intensidad de campo eléctrico no se da a conocer, pero está allí. Estipulamos que la intensidad de campo es una propiedad que existe en el espacio alrededor de los cuerpos cargados.

De manera análoga se puede calcular la fuerza que en el vacío actúa sobre un polo unitario magnético a una distancia de r metros desde otro polo magnético con una intensidad de polo⁽⁷⁾ dada llamada intensidad de campo magnético (H). Esta manera de definir una intensidad de campo magnético es, sin embargo, de poco interés práctico, ya que no se han descubierto “cargas magnéticas” análogas a las eléctricas. Como veremos pronto, es más fructífero asociar fuerzas magnéticas con cargas eléctricas en movimiento.

Normalmente la intensidad de campo eléctrico en un punto dado no es causada solamente por un cuerpo cargado eléctricamente sino por cargas eléctricas en muchos lugares en el entorno cercano y lejano. Con ayuda de la ley de Coulomb se puede, sin embargo, sumar matemáticamente las contribuciones de todas las cargas y calcular la intensidad de campo total.

Normalmente tampoco se calculan las intensidades de campo en el vacío sino en el aire o dentro de cuerpos sólidos de diferentes materiales. En tales cálculos se debe tener en cuenta la propiedad de los materiales de poder ser penetrados por los campos magnéticos y eléctricos. Esto puede realizarse con la ayuda de un método de cálculo creado por el físico inglés *Michael Faraday* (1791–1867), considerado el padre de la electrotécnica moderna.

Faraday nació en un hogar pobre y su padre fue herrero. Desde joven debió aprender encuadernación, lo que le permitió estar en contacto con muchos libros, algo que de otro modo no hubiera sido posible. Al mismo tiempo que coleccionaba extractos de textos relacionados con las ciencias naturales, se dedicaba a realizar experimentos por su cuenta.

En 1812 Faraday obtuvo un permiso para asistir a una conferencia que realizaba sir *Hum-*

(4) Nota del Revisor: Para que E resulte una fuerza, la fórmula (3.2) debe expresarse como sigue: $E = k \cdot Q \cdot [1.(A \cdot s)] / r^2$ De otra forma, la fórmula (3.2) define a E como una fuerza por unidad de carga eléctrica y su unidad es: N / A · s.

(5) Nota del Revisor: Para que E resulte una fuerza, la fórmula (3.2) debe expresarse como sigue: $E = k \cdot Q \cdot [1.(A \cdot s)] / r^2$

De otra forma, la fórmula (3.2) define a E como una fuerza por unidad de carga eléctrica y su unidad es: N / A · s.

(6) Nota del Revisor: Lo expresado puede interpretarse como que la intensidad de campo eléctrico E en un punto se caracteriza por la fuerza E·Q que experimentaría una carga unidad Q situada en dicho punto.

(7) Nota del Revisor: El término correspondiente a intensidad de polo magnético es cantidad de carga eléctrica.

phry Davy (1778—1829), quien se encontraba en la cúspide de su carrera como químico e investigador. Faraday realizó un informe sobre la conferencia y se lo envió a Davy. Éste se interesó en el joven encuadernador y le dio trabajo como asistente, aunque en los primeros años fue fundamentalmente su valet durante un largo viaje a través de Europa.

Luego de su regreso, Faraday tuvo la posibilidad de realizar sus propios experimentos. Pronto demostró tener una habilidad única e imaginación. En 1823 fue elegido para integrar la The Royal Society. Entre 1831 y 1851 realizó un número de investigaciones que fueron publicadas en los documentos de la Royal Society bajo el título *Experimental Researches in Electricity (Investigaciones experimentales en Electricidad)*.

Debido a la falta de estudios en matemática, Faraday nunca logró profundizar en las investigaciones teóricas que estaban a mano después de cada nuevo descubrimiento. En su lugar extrajo intuitivamente las más lúcidas conclusiones y planificó experimentos que ningún otro había imaginado.

Cuando Faraday analizó la naturaleza de los efectos de las fuerzas magnéticas y eléctricas se aferró especialmente a la demostración ilustrativa del campo magnético que se obtiene cuando se colocan limaduras de hierro en un papel sobre un imán. Las limaduras actúan entonces como una ilustración directa de los tubos de flujo que Euler había imaginado. También se puede considerar que ilustraban la trayectoria que estarían obligadas a seguir de acuerdo con el polo magnético correspondiente, si se las introducía en el campo de fuerza.

Faraday veía a los tubos de flujo o las líneas de fuerza como algo que existía en un sentido físico, real. Los polos magnéticos separados estaban unidos mediante líneas de fuerza que pasaban a través de la materia intermedia o a través del vacío. De cada polo magnético se podía imaginar igual número de líneas de fuerza o tubos de flujo que la intensidad de polo del imán expresaba en polos unitarios. De la misma manera se podía imaginar que de cada unidad de carga eléctrica salía una línea de fuerza o un tubo de flujo que, según Faraday, debía terminar siempre en una unidad de carga de signo opuesto. Las unidades de carga eléctricas positivas y negativas siempre tienen relación a través del tubo de flujo, afirmaba Faraday.

El físico inglés *William Thomson* (1824—1907), quien luego sería *lord Kelvin* y profesor de matemática en Glasgow, descubrió que la tesis de Euler sobre que la intensidad de campo debía ser proporcional a la cantidad de tubos de flujo por unidad de superficie, se debía modificar cuando no se tratara del vacío. Thomson afirmaba que la intensidad de campo debía estar referida a la cantidad de tubos de flujo por unidad de superficie (la *densidad de flujo eléctrico*, D) mediante la expresión

$$E = D / (\epsilon \cdot \epsilon_0) \quad (3.3)$$

Para la intensidad de campo (H) debería ser válido, de manera equivalente, que la relación con la *densidad de flujo magnético* (B) se pueda escribir

$$H = B / (\mu \cdot \mu_0) \quad (3.4)$$

Las constantes⁽⁸⁾ en esas expresiones eran la constante dieléctrica (ϵ_0) y la permeabilidad magnética (μ_0).

Un ejemplo de las consecuencias de las fórmulas de Thomson es que se pueden calcular las

(8) Las constantes suelen dividirse en valores relativos sin dimensión, ϵ y μ , y los valores absolutos del vacío, ϵ_0 y μ_0 . La dimensión y tamaño de estas últimas depende de cómo se definan las magnitudes eléctricas y magnéticas D , E , B y H . Para la aplicación práctica son interesantes los valores relativos sin dimensión ϵ y μ . Actualmente son denominados permitividad relativa y permeabilidad relativa, respectivamente.

propiedades en un condensador, por ejemplo, dos placas metálicas paralelas a corta distancia una de la otra. Si se suministra una carga eléctrica a una de las placas, se puede medir una tensión eléctrica entre ellas. Supongamos que la tensión es $U = 100$ voltios. Si la distancia entre las placas es de 2 cm, la intensidad de campo (E) es en cada punto entre las placas de $100/0,02 = 5\ 000$ voltios por metro.

El material eléctrico no conductor suele tener valores de ϵ entre 2 y 6. Supongamos que suministramos un material con $\epsilon = 5$, que llena completamente el espacio entre las placas. Debido a que no hemos modificado la carga eléctrica, según Faraday corresponde la misma cantidad de tubos de flujo eléctricos entre las placas; la densidad de flujo (D) no se ha alterado. Sin embargo ϵ ha aumentado de aproximadamente 1 para el aire hasta 5 para la materia aislante. Según la fórmula de Thomson (3.3) la intensidad de campo ha disminuido a $1/5$ del valor original y será por lo tanto de 1000 voltios por metro. La tensión eléctrica entre las placas, que están a 2 cm de distancia una de la otra, también ha disminuido al $1/5$, es decir, a 20 voltios.

William Thomson se conmovió al observar que muchos fenómenos físicos, por ejemplo, los fluidos líquidos y la conducción del calor, podían describirse con un recurso matemático: *el cálculo vectorial*. También parecía que podía ser utilizado para describir los campos eléctricos y magnéticos. Ciertas cantidades, como la temperatura, son escalares, es decir, pueden describirse con un valor expresado en cifras. Otras, sin embargo, son vectoriales, como por ejemplo la velocidad. La velocidad no tiene solamente un valor numérico sino también una dirección que se puede indicar con una flecha en un diagrama. Si se permite que la dirección de la flecha indique la dirección de la velocidad y la longitud de la flecha es proporcional a la velocidad, la flecha será un *vector* que representa a la velocidad.

De manera semejantes se pueden indicar con vectores las intensidades de campo eléctrico y magnético, que a su vez indican tanto su magnitud como la dirección. El arte de trabajar con vectores fue proyectado como una rama especial de la matemática y significó mucho para la conformación de la teoría de la electricidad.

Las fórmulas de Coulomb eran expresiones empíricas, matemáticas que describían manifestaciones de fuerza eléctricas y magnéticas sin agregar imágenes físicas o explicaciones. Sin embargo, Faraday intentaba con sus líneas de fuerza demostrar que la acción de fuerza está determinada por las propiedades de la materia intermedia (la cual se suponía que en el vacío estaba compuesta por el místico éter). Según Faraday, esta materia era influenciada parte por parte mediante influencia molecular hasta que la influencia finalmente la alcanzara, incluso a grandes distancias. Thomson escribió en 1845, cuando solo tenía 21 años (citado por Liljeström):

Las investigaciones del señor Faraday acerca de la influencia electrostática, publicadas en un estudio que constituía la décimoprimer serie de sus investigaciones experimentales eléctricas, se pusieron en marcha con el fin de probar una idea que tenía desde hace mucho tiempo: que las fuerzas de atracción y repulsión, que se encuentran entre cargas eléctricas libres, no son el resultado de un efecto de larga distancia, sino que se propagan mediante un efecto molecular entre las partículas adyacentes almacenadas en el medio aislante que rodea las células electrificadas y por ese motivo las denominó dieléctricas. Esta idea lo ha llevado a tener opiniones muy peculiares relacionadas con la influencia o, en realidad, sobre todo el efecto eléctrico. Como es imposible que los fenómenos observados por Faraday pudieran ir en contra de los hechos experimentales que fundamentan la teoría de Coulomb, se puede esperar que la diferencia

entre sus ideas y las de Coulomb, depende excluyentemente de un modo diferente de constatar y observar las mismas leyes. Pienso que será posible demostrar que cualquiera de estas formas de ver las cosas, si se realizan a suficiente distancia, podrá establecerse como base de una teoría matemática que también tendrá por consecuencia los principios básicos de las demás. Esta teoría va a ser, por ello, expresión de las leyes más extremas del fenómeno, independientemente de qué hipótesis física nos lleve a abarcar uno u otro fundamento.

La aplicación de Thomson del cálculo vectorial sobre el concepto de campo implicaba importantes ventajas mediante el beneficio de un diagrama/esquema. Thomson utilizó también el concepto “potencial” que fue introducido como un recurso matemático por los matemáticos *Carl Friedrich Gauss* (1777–1855), *Pierre Simon de Laplace* (1749–1827) y *Siméon Denis Poisson* (1781–1840) a fines del siglo XVIII y a comienzos del siglo XIX. En un campo eléctrico, *el potencial eléctrico* es el trabajo necesario para trasladar una unidad de carga desde un punto de referencia (comúnmente un alambre conductor con toma de tierra) hasta un punto donde se indica el potencial. Debido a que la fuerza en cada punto está expresada por la intensidad de campo eléctrico, medida en voltios por metro, el potencial (V) puede indicarse en voltios. La “tensión” eléctrica (U), que también se indica en voltios (V)⁽⁹⁾, es la diferencia de potencial entre dos puntos. *Diferencia de potencial* es por ello una mejor denominación que “tensión”.

La intensidad de corriente eléctrica es una magnitud que todavía no hemos tratado pero que tiene un vital significado para el razonamiento que sigue a continuación.

El físico británico *Stephen Gray* (1666–1736) comenzó a publicar en 1729 en la *Philosophical Transactions* de la Royal Society un número de investigaciones sobre el fenómeno eléctrico. Entre otras cosas había mostrado una bola de marfil que se electrizaba al colgar de un hilo de 26 pies de largo de un tubo de vidrio cuando éste se electrizaba mediante frotación. La propiedad eléctrica se transmitía a través de los hilos.

El estudio de la movilidad de las cargas eléctricas fue más sencillo después de aprender a acumular las cargas eléctricas en lo que actualmente denominamos *condensadores*. El primer condensador eléctrico de importancia fue fabricado por el alemán *E.G. von Kleist* (1700–1748) en 1745. Él descubrió que una botella de gas que tanto en el interior como en el exterior estaba cubierta por un material eléctrico conductor tenía la propiedad de fijar una carga eléctrica. Nadie había pensado en colocar dos placas de metal una cerca de la otra en el aire. En la botella de von Kleist se combinaba una distancia corta con un material aislante entre las capas de metal. Ya en el aire la intensidad de campo debería poder ser alta: $E = U/d$ voltios por metro, si d es la distancia de las placas de metal en metros y U es la tensión en voltios. Pero con la fórmula de Thomson (3.3) la densidad de flujo eléctrico (D) sería seis veces más grande si fuera de vidrio en lugar de aire en el intersticio. De lo anterior resulta que $D = \epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot E$ y es probable que $\epsilon = 6$. Debido a que la densidad de flujo, según Faraday, es proporcional a la cantidad de unidades de carga fijadas, había por ello condiciones para que se fijara una gran carga eléctrica a una tensión adecuada dada en la capa conductora dentro de la botella de gas.

Luego de que la observación de von Kleist fuese repetida por investigadores holandeses y darla así a conocer al mundo científico, su botella condensadora pasó a ser conocida como la *Botella de Leiden*.

La Botella de Leiden fue mostrada ante la corte francesa, acto en el cual no menos de 180

(9) El lector no debe confundirse por un *símbolo de magnitud* pues el potencial eléctrico es el mismo que la abreviatura de la unidad correspondiente a voltios, “V”.

personas construyeron una larga cadena tomadas de la mano. Las dos últimas tocaron la parte exterior e interior de la botella cargada de electricidad por frotación. De esa manera la botella se descargó a través de toda la cadena de personas de una manera sensible y convincente.

El médico británico *William Watson* (1715–1787) repitió este experimento en 1747, pero reemplazó la cadena humana por un alambre de hierro de 4 kilómetros de longitud. Se había basado no solo en las experiencias de la corte francesa sino también en el experimento de su compatriota Stephen Gray con magnitudes considerablemente menores de electricidad a fines de la década de 1720. El Dr. Watson intentó estimar el tiempo que le llevaba al fenómeno eléctrico en propagarse a lo largo del alambre de hierro, pero sucedió tan velozmente que le resultó imposible registrar un espacio de tiempo mensurable.

Después del descubrimiento de las propiedades de la Botella de Leiden, se popularizaron los juegos con la electricidad y se intentó utilizarla con propósitos medicinales. Se dice que un cerrajero de Génova habría sido curado de parálisis en su brazo derecho en 1747, mediante un tratamiento con descargas eléctricas durante dos meses.

Sin embargo, crecía la superstición y la ignorancia. Los experimentos eléctricos comenzaron a estar vinculados con la difusa representación sobre el "magnetismo animal" que a fines del siglo XVIII difundió el médico alemán *Franz Mesmer* (1734–1815), después de haber obtenido el diploma de doctor en medicina en Viena en 1766, con un tratado sobre el efecto de los planetas en el cuerpo humano. Mesmer afirmaba que se podían curar todas las enfermedades conocidas utilizando imanes, pero los imanes también podían ser reemplazados por la propia fuerza hipnótica del magnetizador. A este místico magnetismo animal se lo llamó *mesmerismo*.

En el libro *Gustavianskt* (Ingvar Andersson y otros) se menciona el siguiente artículo, extraído de un periódico sueco de 1803:

La utilidad de la electricidad

Se dio a conocer la situación de un hombre de 58 años de la parroquia de Kudby, cuya posición corporal indica que está paralizado sin enfermedad previa en su lado derecho, insensible al calor y sin fuerzas, como si estuviera muerto de la cabeza a los pies.

Al día siguiente fue enviado al pastor A.G. Dahlin de la parroquia de Håradshamar, donde fue recibido para ser electrizado. Al recibir la primera descarga eléctrica, tan fuerte que derritió metales y realizó orificios a través del cartón más grueso, quedó totalmente insensible.

Pero después de varias repeticiones finalmente recuperó la sensibilidad y la fuerza, tanto que pudo mover los pies y levantar la mano hasta la boca durante el primer día. El segundo día levantó su pie y elevó su mano por encima de la cabeza; el tercer día caminó lentamente en terreno uniforme; el cuarto día bajó las escaleras. El quinto día pudo ascender por sí mismo a un carruaje y conducir a su caballo y el sexto día caminó solo por los jardines del prado. Finalmente se curó después de un período de 3 a 4 años, y puede realizar todas sus tareas hogareñas.

J.P. Wallensteen

Era común que los pastores compitieran en la profesión médica. En los viejos tiempos la evolución de la asistencia médica avanzaba paralelamente con la de la iglesia. La Asociación de Médicos de Suecia fue fundada en 1807. Por eso no sorprende el siguiente comunicado de la casa del párroco de Steninge y Heda del 6 de julio de 1807 (citado en *Gustavianskt*):

Pastor cura enfermos con máquina de electricidad

El uso de la electricidad en epilepsia, en especial en pacientes débiles de nervios, y también en convulsiones provocadas por la lombriz solitaria tanto en personas mayores como jóvenes, ha sido aplicado a pedido muchas veces en mis pequeños experimentos. En los primeros los paroxismos con frecuencia y en alto grado han vuelto, con dolor en las pantorrillas y la enfermedad después de largo tiempo ha continuado o también los ha abandonado completamente. El resto de los pacientes han tenido fuertes estremecimientos y ceguera durante algunos minutos además de zumbidos en los oídos y han dado cuenta de lombrices de mayor o menor tamaño. La leche cuajada se utiliza con las lombrices de mayor tamaño y los laxantes con las más pequeñas, habiéndoselos encontrado luego como efectivos

Con frecuencia he deseado contar con una máquina de electricidad más grande para poder realizar mi trabajo a gran escala, pero tengo que arreglármelas con una más pequeña. Quisiera contar también con una casa con 3 o 4 camas, en parte para que ocupen y amplíen la electricidad y la farmacia de la parroquia, según el método de Darelii; y en parte también para llevar hasta aquí a viejos guerreros enfermos que busquen y necesiten mi famoso tratamiento. Pero los pocos recursos se me niegan todavía para alcanzar esta satisfacción.

Casa Rectoral de Steninge y Heda, 6 de julio de 1807

HANS OLOF SUNDELIUS

La referencia de Sundelius al Método Darelii no está relacionado con la electricidad sino al escrito *Sockenapothek och någre huscurer (La farmacia parroquial y algunas curaciones caseras)*, escrito por el jefe de servicio médico del hospital Serafimer, *Johan Anders Darelius*, en 1760.

Mayor orientación científica tuvieron los intentos realizados a fines del siglo XVIII por *Aloisius Galvani* (1737–1798), profesor de anatomía práctica en la universidad de Bolonia. Galvani descubrió en estudios ambiciosos de los nervios y movimientos musculares de las ranas que el efecto eléctrico generaba fuertes espasmos en sus muslos. En 1791 publicó un estudio llamado *De viribus electricitatis in moti musculari* (“Sobre las fuerzas eléctricas en los movimientos musculares”).

El descubrimiento más interesante de Galvani no fue, sin embargo, que los músculos de los muslos de la rana se contraían si eran sometidos a electricidad. Lo más interesante fue que también se contraían de la misma manera si se tocaban los nervios de la médula espinal con un alambre de cobre que estuviese en contacto con una placa de hierro sobre el cual la rana se encontraba en reposo, sin que estuvieran sometidos a electricidad externa. Esto hizo que Galvani extrajera la perspicaz, aunque errónea conclusión de que el cuerpo de la rana funcionaba como una fuente de electricidad.

La explicación correcta fue descubierta por el compatriota de Galvani, *Alessandro Volta* (1745–1827). Durante la década de 1790, Volta realizó una serie de experimentos para demostrar la teoría de Galvani, es decir, que en el cuerpo de la rana había “electricidad animal”, de la misma manera que Mesmer había hablado de “magnetismo animal”. Volta examinó los experimentos de Galvani con mirada crítica y pudo eliminar, paso a paso, las observaciones que carecían de importancia. Aún en mayo de 1792 él compartía la idea de Galvani de que la electricidad se producía en el cuerpo del animal pero después de experimentos realizados durante algunos meses cambió de opinión. Él colocó alambres de metal que tocaban puntos cercanos a una fibra nerviosa, mientras que el cuerpo del animal estaba “desconectado” de la electricidad durante el experimento. A pesar de que los músculos (que Galvani creía que producían electricidad) estaban desconectados y aislados, Volta pudo

provocar un espasmo muscular que solo podía explicarse ante la presencia de electricidad. Pero, ¿de dónde provenía?

Volta se dio cuenta de que el único factor físico que todavía no había examinado era el contacto entre los diferentes metales utilizados en el experimento. Quizá la electricidad se producía cuando los diferentes metales se tocaban entre sí. Pero si esto era así, ¿cómo era posible que no se hubiese descubierto antes en los innumerables experimentos realizados con la electricidad?

La explicación, propuso Volta, debía residir en el hecho de que Galvani fue el primero que, al experimentar con los nervios de las ranas, había utilizado un detector de electricidad suficientemente sensible. Los nervios reaccionaban a cantidades de electricidad que eran demasiado pequeñas para ser descubiertas de otra manera. Era por ese motivo que la electricidad de contacto no había podido ser descubierta.

Durante sus experimentos Volta descubrió que no necesitaba utilizar los nervios de la rana para demostrar la electricidad. También funcionaba bien con los nervios del ser humano, y de manera más sencilla con los nervios gustativos de la lengua.

Volta realizó los siguientes experimentos (se sugiere a los lectores no repetirlos, por existir riesgo de asfixia): Él colocó papel de estaño, es decir, estaño y no el actual papel de aluminio, que habría sido mucho mejor, en la punta de la lengua y una moneda de plata en la raíz de la lengua. Si hubiera utilizado una cuchara de plata habría sido menos riesgoso. Volta sintió un sabor agrio en la punta de la lengua. Si intercambiaba de lugar el papel de estaño y la moneda, sentía un sabor alcalino.

Esto hizo que Volta ordenara los metales y algunos conductores eléctricos según el fenómeno gustativo en la punta de la lengua, de agrio a alcalino:

cinc→papel de estaño (estaño)→hierro→cobre→oro→plata→carbón

Volta descubrió también que para la producción de electricidad era importante que las dos sustancias constituyeran un circuito eléctrico a través de un conductor húmedo, por ejemplo, una solución salina o la saliva en la lengua. Por ello hizo una pila de placas de metal de dos en dos de plata y cinc, separadas por paños humedecidos en agua salada. El 20 de marzo de 1800 Volta comunicó en una carta dirigida a la británica Royal Society que había descubierto un dispositivo con capacidad de generar descargas eléctricas. Ese dispositivo recibiría luego el nombre de Pila de Volta.

Así quedaba claro que la "electricidad animal" de Galvani había sido una interpretación errónea, pero había algo de verdad en ello, si se tiene en cuenta lo que sabemos actualmente sobre los torpedos (n. del t.: torpedinidae) y las corrientes de acción del corazón. La pila de Volta pudo ser utilizada como una fuente resistente a las descargas eléctricas de mayor duración que las descargas de la botella de Leiden. Con el tiempo la pila de Volta fue modificada en una serie de vasos unidos conteniendo una solución salina con metales seleccionados adecuadamente. El dispositivo fue denominado batería galvánica, en honor a Galvani. El desarrollo posterior ha llevado a las actuales baterías para linternas.

Si se conectan los polos externos de una pila a través de un hilo de metal, una corriente eléctrica pasará a través del hilo y al hacerlo, lo calienta. La corriente eléctrica permanente que se pudo obtener de las pilas galvánicas fue una experiencia nueva, comparado con las cortas descargas eléctricas de las botellas de Leiden. Dado que ahora también se podía experimentar con corrientes eléctricas, es decir, cargas eléctricas en movimiento, se abrían las puertas para

descubrimientos totalmente nuevos: las relaciones entre la electricidad y el magnetismo.

Cuando el físico danés *Hans Christian Ørsted* (1777–1851) en 1820 experimentó con alambres conductores, descubrió que la aguja de la brújula modificaba su dirección si se encontraba cerca de los cables. La causa se debía a que una corriente eléctrica que recorre un alambre conductor genera un campo magnético.

Ørsted, que todavía no hablaba sobre la "corriente eléctrica", dijo que la batería galvánica producía a través del cable conectado un "conflicto eléctrico" en el entorno. Los campos magnéticos recientemente descubiertos se diferenciaban de los anteriores campos magnéticos estudiados ya que las líneas de fuerza no comenzaban y terminaban en los polos magnéticos. En su lugar, describían círculos cerrados alrededor de los alambres conductores de corriente.

Por primera vez se había observado una relación directa entre la electricidad y el magnetismo. Ørsted describió el fenómeno en un folleto el 21 de julio de 1820.

El descubrimiento de Ørsted se debatió intensamente en diferentes sociedades científicas, sobre todo en la Academia de Ciencias francesa. El físico y matemático *André Marie Ampère* (1775–1836) dio una explicación del fenómeno el 18 de septiembre de 1820. Afirmó, según Liljeström:

El efecto electromotor se manifiesta mediante dos tipos de efectos, que primero debo diferenciar mediante una pormenorizada definición. A la primera la denomino "tensión eléctrica" y a la segunda "corriente eléctrica".

Así se acuñaba el término *corriente eléctrica* y luego resultó natural denominar *ampere* a la unidad en la que se indicaría. *Ampère* sostenía que una corriente de cargas eléctricas fluía a través de los alambres conductores de la batería galvánica. La corriente generaba un campo magnético cuyas líneas de fuerza construían círculos que describían un movimiento de rotación en la misma dirección que si se hubiera usado un destornillador para atornillar un tornillo en dirección de la corriente. La relación entre la densidad de flujo magnético (B), a la distancia r de los alambres conductores y la intensidad de corriente (I) a través de los mismos fue formulada tanto por *Ampère* como por los físicos franceses *Jean-Baptiste Biot* (1774–1862) y *Félix Savart* (1791–1841). *El equipo de Biot–Savart*, también en 1820, estableció la relación como

$$B = \text{konst} \cdot I / r \quad (3.5)$$

La verdadera naturaleza de la corriente, es decir, qué es lo que fluía, no quedaría claro sino hasta fines del siglo XVIII, cuando se comenzaron a formular teorías sobre las unidades de cargas eléctricas móviles al estudiar descargas de gas.

4 | Las ondas electromagnéticas

El ingenioso Faraday decidió en 1821 investigar si también se podía ir en el sentido contrario. Si las corrientes eléctricas generaban campos magnéticos, los campos magnéticos quizá generaban también corrientes eléctricas.

El instrumento que Faraday tenía para descubrir y medir las corrientes eléctricas era el galvanómetro, propuesto por Ampère en septiembre de 1820. Estaba compuesto de un alambre conductor a través del cual se dejaba pasar la corriente eléctrica.

El primer intento de Faraday consistió en conectar una batería galvánica a un alambre conductor que estaba envuelto en forma de bobina en un rodillo de madera. En el mismo rodillo de madera había otro alambre conductor envuelto en forma de bobina alrededor del primero. Este último cable estaba conectado a un galvanómetro. Cuando Faraday conectó la primera bobina a la batería galvánica esperaba, tal como lo indicaban las experiencias de Ørsted y Ampère, que se formarían líneas de fuerza magnética a través de la bobina. También esperaba que esas líneas de fuerza, que también pasaban a través de la otra bobina, generaran una corriente eléctrica a través de ésta y que se indicara en el galvanómetro.

Pero la aguja del galvanómetro señalaba obstinadamente en la misma dirección que antes. Faraday no logró crear corriente alguna a través de la otra bobina, a pesar de haber logrado generar un campo magnético. Después de repetidos intentos observó que la aguja del galvanómetro se movía cada vez que conectaba su bobina a la batería y también cuando la desconectaba.

Faraday arribó a la conclusión de que lo que generaba una corriente eléctrica no era el campo magnético como tal, sino *la variación* del campo magnético. Logró sostener su conclusión cuando el galvanómetro se movió si cambiaba rápidamente de sitio la bobina transportadora de corriente en relación con la otra. Tan pronto como se variaba el campo magnético, parecía que una descarga eléctrica atravesaba la bobina secundaria.

Faraday carecía de los conocimientos matemáticos necesarios para formular leyes físicas que pudieran describir sus observaciones, pero realizó sistemáticamente todas las investigaciones necesarias para dar el material de partida a los teóricos. El mérito de señalar cuáles eran los recursos matemáticos disponibles se atribuye a William Thomson (lord Kelvin). Los debates fundamentales sobre esos problemas fueron publicados en 1872 con la ayuda de su colega, *James Clark Maxwell* (1831–1879), seis años más joven que él. Le correspondería a Maxwell vestir las observaciones de Faraday con el atuendo matemático.

Al mismo tiempo que Maxwell ayudó a Thomson a editar sus escritos completos en 1872, trabajaba en un manual que haría historia: su *A Treatise on Electricity and Magnetism*, editado en 1873. En este libro Maxwell incluyó sus famosas ecuaciones que vinculaban definitivamente a los fenómenos eléctricos con los magnéticos al considerar el tiempo en el cálculo:

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{I} + d\mathbf{D}/dt \quad (4.1)$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = -d\mathbf{B}/dt \quad (4.2)$$

Las ecuaciones muestran que es necesaria una variación con el tiempo (es decir, $d\mathbf{D}/dt$ y $d\mathbf{B}/dt$, respectivamente) de los flujos eléctricos y magnéticos para que aparezcan los equivalentes campos magnéticos y eléctricos⁽¹⁾ respectivamente. La denominación “rot” (en inglés, “curl”) es una expresión matemática para el cálculo de un fenómeno de remolino (“rot” significa “rotación”) e implica en este contexto que los nuevos campos creados como consecuencia de los cambios tienen una dirección de rotación alrededor de la dirección del flujo que fue modificado.

(1) Nota del Revisor: En ausencia de corrientes eléctricas o cargas eléctricas, respectivamente

Las letras en negrita (bold) **H, I, D, E y B** muestran que las magnitudes deben ser consideradas como vectores y que, por ello, tienen una dirección.

De las ecuaciones de Maxwell surge que no hay campos magnéticos alrededor de un cable cargado con electricidad estática, pues el campo eléctrico es constante y tanto $I^{(2)}$ como $dD/dt = 0$. Pero si las cargas eléctricas comienzan a moverse, el estado ya no es estático y la corriente eléctrica I crea, según la primera ecuación de Maxwell (4.1), un campo magnético que genera líneas de fuerza circulares alrededor del conductor. En tanto la corriente fluya invariablemente, la corriente de conducción I será constante y por ello también el campo magnético será constante. Tal como lo demostrara el primer experimento de Faraday, esto no genera ningún campo eléctrico nuevo. Si la corriente se interrumpe, el campo magnético deja de existir, lo cual significa que dB/dt momentáneamente tiene un valor negativo muy alto, lo cual, según la segunda ecuación de Maxwell (4.2) genera por un momento un campo eléctrico. Fue este campo, el cual existió durante el tiempo que le lleva desaparecer al campo magnético, lo que genera una descarga de corriente en la bobina secundaria de Faraday⁽³⁾.

Faraday ya había muerto seis años atrás cuando Maxwell publicó su manual. Por eso no tuvo nunca la satisfacción de ver sus observaciones generalizadas mediante la sencillez en el planteo de las ecuaciones de Maxwell que, a pesar de su limitada educación en matemáticas, habría seguramente comprendido.

Faraday habría comprendido fundamentalmente la inercia contra los cambios que pueden mostrar a veces los fenómenos eléctricos. Él había observado que la tensión sobre una bobina conductora no desaparece de inmediato cuando se interrumpe la corriente eléctrica en la bobina. Acerca de esto, él escribió lo siguiente, según Liljeström:

El primer pensamiento que despiertan los sentidos es que la electricidad circula en los cables con algo semejante a la *inercia* y que por lo tanto un cable largo en la interrupción de la corriente causa efectos mientras que un cable corto no. Sin embargo, tal explicación se viene abajo por el hecho de que la longitud del cable causa efectos importantes diferentes, dependiendo de si el cable está extendido o envuelto en espiral o si el bobinado constituye un electroimán.

Por consiguiente era el campo magnético creado por la corriente lo que generaba la inercia que Faraday observó. El fenómeno que consideró extraño fue que se puede poner en cortocircuito los polos de una pila galvánica con un cable de cobre corto sin que se produzca ninguna chispa eléctrica. Pero si se conectan los polos de la pila a través de un alambre conductor que forme parte de una bobina alrededor de un electroimán y luego se interrumpe el contacto, aparece una chispa que indica una tensión mayor que aquella que la pila puede haber generado.

Esta es, nuevamente, una consecuencia de las ecuaciones de Maxwell. La corriente de la pila puede generar un campo magnético poderoso mediante la bobina conectada, incluso si la tensión no es alta. La intensidad del campo magnético depende solamente de tres factores: La intensidad de corriente, la cantidad de vueltas y la permeabilidad magnética $m^{(4)}$ en los eventuales núcleos de hierro de la bobina. La cuantía del nivel de corriente será, según la ley de Ohm (de 1827)⁽⁵⁾ igual a la tensión dividida por la resistencia, indicada en ohm (W). Con un alambre de cobre grueso la re-

(2) Nota del Revisor: "Densidad de corriente eléctrica". Su unidad en el Sistema Internacional de Unidades es A / m^2 .

(3) Nota del Revisor: Similares consideraciones rigen ante cualquier variación de la intensidad de corriente eléctrica en el circuito

(4) Nota del Revisor: Por coherencia con la ecuación 4.3 de este capítulo, μ = permeabilidad magnética relativa

(5) Palabra derivada del físico alemán *Georg Simon Ohm* (1787–1854), luego de grandes dificultades prácticas, mayores de las que nos podemos imaginar.

sistencia será insignificante y la corriente alta, incluso en caso de baja tensión de la pila. En tanto la corriente pase a través del alambre en la bobina, se mantiene un fuerte flujo magnético a través de la bobina, según la primera ecuación de Maxwell (4.1). Cuando el cable se corta, desaparece la corriente y con ello también debe desaparecer el campo magnético. Esto implica una fuerte modificación del campo magnético, que, según la segunda ley de Maxwell (4.2), da lugar a un campo eléctrico en la bobina. El campo eléctrico se da a conocer a través de una tensión entre los extremos de la bobina. La intensidad de campo eléctrico, y con ello la tensión, será más elevada en la medida en que la modificación del campo magnético tenga lugar de manera más rápida⁽⁶⁾. De esta manera la tensión puede ser mucho mayor que la tensión de la pila original, que daba la corriente suficiente para mantener el campo magnético que luego desaparecería.

La capacidad de la bobina de cable para crear un campo magnético se describe en la actualidad por su inductancia (L), que se indica con la unidad henry (H).⁽⁷⁾ Una bobina tiene inductancia de 1 henry si una variación de la intensidad de corriente de 1 ampere por segundo da lugar a una tensión inducida de 1 voltio entre los extremos de la bobina. 1 henry es por lo tanto lo mismo que 1 voltio segundo/ampere (Vs/A).

Para estudiar de manera práctica las relaciones electromagnéticas se necesitaba también una magnitud, *la capacidad o capacitancia eléctrica* (C), que indica la capacidad del condensador de fijar cargas eléctricas. La unidad de capacidad es el *faradio* (F), y un faradio es la capacidad de fijación de carga de un condensador capaz de fijar una carga de 1 culombio (1 C = 1 ampere segundo, “As”) cuando la tensión entre las placas del condensador es de 1 voltio. Un faradio es, por ello, lo mismo que un ampere segundo/voltio (1 As/V).

Lo interesante es que ahora se podía “traducir” los fenómenos eléctricos a fenómenos mecánicos, lo cual facilitaba la comprensión de situaciones no estáticas. Un circuito eléctrico con un condensador conectado a una bobina podía, por ejemplo, compararse con un sistema mecánico compuesto por una masa en un eje oscilante. Para el siguiente cuadro de traducciones rigen las mismas expresiones matemáticas para las oscilaciones que puedan producirse:

	corresponde a:
carga eléctrica	desviación de la masa de su equilibrio
intensidad de corriente	velocidad de la masa
tensión eléctrica	fuerza mecánica que actúa sobre la masa
energía eléctrica acu mulada en el condensador	energía potencial de la masa
energía eléctrica almacenada en la bobina	energía cinética de la masa

Si se quiere poner una masa en movimiento desde una posición de equilibrio, debe suministrarse energía, por ejemplo, comprimiendo un resorte o levantando un eje. La energía va a estar por un instante almacenada como energía potencial hasta que la masa comience a moverse. En una nueva posición, cuando el resorte está completamente distendido o el eje ha alcanzado su posición más baja, ya no hay energía potencial, sino que toda la energía ha pasado a energía cinética y la masa ha alcanzado su velocidad más elevada. Todo se debe a que la masa oscila hacia adelante y hacia atrás, cambia la energía entre energía potencial y cinética al mismo tiempo que el sistema pierde energía por la fricción, lo cual hace que las oscilaciones de esta manera se reduzcan.

(6) Nota del Revisor: Velocidad de cambio del vector campo magnético

(7) En honor al físico estadounidense *Joseph Henry* (1797–1878).

La misma expresión matemática puede describir las oscilaciones en el sistema eléctrico. Una comparación nos dice entonces que la energía que está almacenada en un condensador puede dar lugar a una corriente eléctrica (equivalente al movimiento en la masa) mediante un circuito conductor conectado con una bobina. Esto da lugar a oscilaciones en el circuito eléctrico, de tal modo que la energía está almacenada alternativamente como energía eléctrica en el condensador y energía magnética en el campo magnético de la bobina. La oscilación se reduce al desaparecer la energía del sistema en forma de calor en el alambre conductor⁽⁸⁾. Faraday pudo también demostrar que la energía se pierde si el campo magnético es utilizado para realizar un trabajo, por ej., para generar movimiento en un motor eléctrico.

Una propiedad importante de las ecuaciones de Maxwell es que introduce el concepto tiempo en las fórmulas. Las fórmulas anteriores, por ejemplo, la Ley de Coulomb, habían descrito solamente el estado estático. Las ecuaciones de Maxwell describen el estado dinámico, aquel que responde a movimientos en un sistema mecánico. Era inevitable que se comenzara a pensar sobre cuánto tiempo transcurriría desde el momento en que se hubiera activado un circuito eléctrico que incluyera una bobina magnética hasta el momento en que una variación en la intensidad de campo magnético alcanzara puntos alejados del circuito. Así como las ecuaciones de Maxwell estaban formuladas, no se podía alcanzar una variación sin que hubiese transcurrido cierto tiempo.

Si nos imaginamos un caso sencillo con un alambre conductor recto en el cual fluye una corriente eléctrica constante, sabemos por las observaciones de Ampère y con la ayuda de la primera ecuación de Maxwell (4.1) que alrededor del alambre conductor hay un campo rotacional magnético estacionario, es decir, líneas de fuerza magnéticas que circulan alrededor del cable en círculos cerrados. Si repentinamente cambiamos la dirección de la corriente y esperamos un instante muy breve, podemos imaginarnos una nueva situación, en la cual, en el momento dado, la intensidad de campo magnético más cercano al cable está determinado por la nueva corriente, pero donde el “mensaje” acerca de la variación todavía no ha llegado a las áreas alejadas, debido a la gran distancia desde el cable. Entre el campo magnético nuevo y el viejo debe existir entonces un área donde la intensidad de campo magnético se está modificando, de los valores viejos a los nuevos. Pero según la segunda ecuación de Maxwell (4.2), la variación del campo magnético debe generar un campo eléctrico en el área.

Cuando la corriente en el alambre conductor se modifica, se propaga una variación del campo magnético como movimiento ondulatorio desde el cable y allí donde la onda produce la modificación del campo induce un campo eléctrico. Si la ondulación pasa por otro alambre conductor, por ej., una antena, una corriente eléctrica será inducida sobre ella durante un breve instante.

Si la corriente en el cable conductor no cambia de dirección solamente una vez, sino que lo hace ininterrumpidamente y con una frecuencia constante (f), es decir, se constituye una corriente alterna, las ondas van a ser enviadas una después de la otra con nuevas variaciones del campo magnético. Esto implica también una onda después de la otra de intensidad de campo eléctrico de corta duración. La distancia entre ondas adyacentes con el mismo “mensaje” sobre la variación del campo constituye una longitud de onda (λ). El producto de la frecuencia y la longitud de onda es, como todas las ondulaciones, igual a la velocidad de propagación (v) de la onda: Compárese con la ecuación 2.1.

(8) Nota del Revisor: La amplitud de la oscilación se reduce al disminuir la energía del sistema debido al calor transferido al ambiente por el alambre conductor o debido al trabajo realizado por el sistema

A diferencia de las ondas mecánicas, donde algo cambia de posición (p. ej., la superficie del agua o las moléculas en el aire), la onda electromagnética no implica otra cosa que cambios progresivos de las intensidades de campo magnético y eléctrico en el espacio. Tanto Faraday como Maxwell buscaron una explicación al efecto de larga distancia de las fuerzas que esto implicaba, y se imaginaron algún tipo de medio elástico, como el éter, que llevara las ondas. Trabajaron en gran medida con analogías mecánicas en sus intentos de comprender los fenómenos. Quizá debamos dejar de lado la ambición de "comprender" los fenómenos de campo y conformarnos con el mundo de los términos matemáticos que nos permiten describirlos con ayuda de modelos.

Se hicieron muchos intentos para ver cómo las magnitudes eléctricas, potencial y corriente, y sus unidades, voltios y amperes, se adaptarían a las magnitudes físicas de longitud, masa y tiempo. El ser humano es libre de elegir las unidades para esas tres magnitudes (metro, kilogramo y segundo) pero una vez realizada la elección, hay muchas unidades que son secundarias. La fuerza, por ejemplo, puede ser calculada como masa multiplicada por la aceleración y por lo tanto se obtiene la dimensión $\text{masa} \times \text{longitud} / \text{tiempo}^2$, por lo cual la unidad de fuerza será en realidad kgm/s^2 a pesar de que esta unidad se denomina *newton* (N). La unidad de energía *joule* (J) es equivalente a otra cantidad de constelaciones de unidades: $1 \text{ joule} = 1 \text{ newton} \cdot \text{metro} (1 \text{ Nm}) = 1 \text{ watt} \cdot \text{segundo} (1 \text{ Ws}) = 1 \text{ voltio} \cdot \text{ampere} \cdot \text{segundo} (1 \text{ VAs})$.

La intensidad de campo eléctrico se indica en voltios/metro, pero $1 \text{ V/m} = 1 (\text{Nm/As})/\text{m} = 1 \text{ N/As}$, lo cual brinda un vínculo más comprensible con la ley de Coulomb (3.1). De manera equivalente será $1 \text{ voltio} = 1 \text{ Nm/As}$. Los sistemas de magnitudes y unidades eléctricas y mecánicas pueden unificarse si las tres unidades básicas (metro, kilogramo y segundo) se completan con una cuarta unidad eléctrica, el ampere. La definición actual de un ampere es la intensidad de una corriente que fluye a través de dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, situados a un metro de distancia uno del otro y que produce una fuerza de 2.10^{-7} newton por metro de longitud de cada conductor.⁽⁹⁾

La conciliación de magnitudes y unidades de diferente tipo ha sido un rompecabezas durante largo tiempo, donde también ha habido posibilidad de elegir la magnitud de las constantes ϵ_0 y μ_0 al igual que la constante en la ley de Coulomb. Los diferentes sistemas de unidades han sido probados durante el curso de los años antes de que el actual *Système International d'Unités* (SI) fuera universalmente aceptado. Dependiendo de dónde se fijen los sistemas con definiciones básicas ha sido necesario un factor 4π y a veces una constante "c" con la dimensión velocidad para que todo concuerde.

Cuando uno de los más grandes matemáticos del mundo, Carl Friedrich Gauss, pensaba en 1835 acerca del término potencial, vio una relación entre la ley de Coulomb para las cargas en reposo y la ley de Ampère para cargas en movimiento y arribó a la conclusión de que las cargas en movimiento se influyen mutuamente con otras que están en reposo. Esa idea fue considerada por su compatriota Wilhelm Weber (1804–1891), quien quiso crear un sistema de unidades basado en los fenómenos electromagnéticos. Weber intentó completar la ley de Coulomb con un término dinámico, el "potencial electrodinámico", que tendría en cuenta el movimiento de las cargas. Sin embargo, las ecuaciones de Maxwell harían esto de una manera más elegante.

Para lograr que su término dinámico se sumara a los estáticos de Coulomb, Weber se vio obligado a introducir una constante que se pudiera escribir $1/c^2$, donde c tenía la dimensión velocidad. Para poder probar la expresión de Weber de manera experimental, se debía conocer

(9) Nota del Revisor: La corriente debe ser constante y los conductores deben ser de sección circular despreciable y estar situados en el vacío.

el valor de esta constante. Weber realizó junto con el físico Rudolf Kohlrausch⁽¹⁰⁾ (1809—1858) intentos para estimar c . Descubrieron que el valor numérico de la constante c era aproximadamente igual que el valor numérico de la velocidad de la luz. Esto alentó a Maxwell. De sus ecuaciones se desprende que las ondas electromagnéticas deben tener una velocidad de propagación (v) que cumpla la condición:

$$v^2 = 1/(\epsilon\epsilon_0 \mu\mu_0) \quad (4.3)$$

Esto significa que la onda debe tener diferente velocidad de propagación en diferentes medios. Si a la velocidad en el vacío ($\epsilon = \mu = 1$) le corresponde la designación c , entonces se trata de que $c^2 = 1/(\epsilon_0\mu_0)$, y por lo tanto:

$$c/v = \sqrt{\epsilon\mu} \quad (4.4)$$

Si una expresión equivalente fuera válida para la *luz* visible, es decir, si c fuera la velocidad de la luz en el vacío (o aproximadamente en el aire) y v la velocidad de la luz en un medio más denso, c/v sería igual al índice refractométrico (n) para medios más densos. ¿Sería posible que la luz, cuya naturaleza verdadera todavía era absolutamente desconocida, no fuera otra cosa que una onda electromagnética?

Era una hipótesis fantástica pero podía probarse experimentalmente. Se trataba de ver si $\sqrt{\epsilon\mu}$ realmente era igual a n para una cantidad de sustancias transparentes, lo cual para la mayoría de ellas significaría que $n = \sqrt{\epsilon}$ ya que como regla $\mu \approx 1$. En la época de Maxwell las estimaciones de ϵ no eran especialmente buenas, pero el material existente apoyaba la hipótesis.

Una idea esencial de la teoría de Maxwell fue que la corriente eléctrica no solo podía ser entendida como la corriente conductora que parecía poder explicarse por alguna forma de transporte de la electricidad mediante conductores. También se supuso que estaba compuesta por una *corriente de desplazamiento* que podía aparecer gracias a que las corrientes eléctricas que no se movían libremente sino que parecían fijadas, por ejemplo, en las moléculas de un material aislante, podían sin embargo desplazarse en distancias muy pequeñas en una u otra dirección del campo eléctrico.

En intensidades de campo eléctrico constantes la corriente de desplazamiento no podía admitir movimientos de la electricidad en el medio aislante. Sin embargo si el campo eléctrico variaba con alta frecuencia, los movimientos giratorios en las cargas fijadas tendrían el mismo efecto que una corriente de conducción.

Una ampliación del término se basaba en la representación de un campo eléctrico donde los “tubos de campo” salen de cada carga eléctrica. Una corriente que atraviesa un alambre conductor implica entonces al mismo tiempo una migración de los tubos de campo fuera del conductor. La corriente de desplazamiento en frecuencias altas podría ser de mayor importancia que la corriente de conducción. En caso extremo la corriente de desplazamiento en el espacio sería equivalente a la corriente eléctrica en un conductor. La corriente en el conductor dará lugar a un campo magnético, pero eso también lo hará el campo eléctrico variable en el espacio, incluso en el vacío. Ante la ausencia del éter, que podría dar una analogía mecánica a las ondas electromagnéticas, debemos permitir que los fenómenos sean representados por el modelo matemático que dan las ecuaciones de Maxwell.

(10) Padre de *Friedrich Kohlrausch* (1840—1911), conocido entre innumerables ingenieros y estudiantes de física por su libro de física al que llamaban simplemente “Kohlrausch”.

La teoría electromagnética de la luz de Maxwell fue recibida en principio con gran escepticismo hasta que el joven físico alemán *Heinrich Hertz* (1857–1894) pudo presentar el 13 de diciembre de 1888 un ensayo, *Über Strahlen elektrischer Kraft*, en el cual explicaba cómo había logrado crear radiación electromagnética con la ayuda de corriente alterna eléctrica de alta frecuencia. Ya no había ninguna duda referida a las cargas eléctricas en movimiento que daban lugar a ondas electromagnéticas.

Hertz trabajó con un emisor y un receptor sin ningún conector entre ellos pero ambos provistos de antenas y explosor. Cuando el emisor estaba funcionando se podían observar chispas en el explosor del receptor. No era posible ninguna otra explicación excepto que se trataba de una onda electromagnética entre el emisor y el receptor. Hertz había descubierto las *ondas de radio*. La unidad *hertz* (= un ciclo u oscilación por segundo), que se utiliza en la actualidad para indicar frecuencias es un homenaje a Heinrich Hertz.

El inglés *John Henry Poynting* (1852–1914) pudo en 1884, con ayuda de las ecuaciones de Maxwell, demostrar que los campos electromagnéticos son portadores de energía y que hay un transporte de energía orientado perpendicularmente tanto a la dirección del campo eléctrico como del campo magnético, lo cual significa que la energía se transporta en la dirección de propagación de la onda, representada por el “vector de Poynting”.

Si los ciclos u oscilaciones eléctricas en escala macroscópica podían dar lugar a ondas electromagnéticas, ¿no era posible entonces que las cargas eléctricas en átomos y moléculas también pudieran oscilar de tal manera que fueran fuentes de ondas electromagnéticas? Si ese fuera el caso, entonces existiría una explicación para la radiación térmica. Cuanto más elevada la temperatura, más intenso se puede esperar que sea el movimiento térmico en las moléculas de un cuerpo, incluidas sus cargas eléctricas. De ello se debería deducir que los cuerpos calientes irradian ondas electromagnéticas con frecuencias cada vez más altas, es decir, con cada vez menor longitud de onda, cuanto más alta sea la temperatura.

Comenzaba a quedar claro que las radiaciones térmicas y la luz visible eran ondas en forma de variaciones de intensidad en campos eléctricos y magnéticos, de la misma manera que las demostradas ondas de radio de Hertz. Las ondas electromagnéticas comprendían por lo tanto longitudes de onda de diezmilésimas de milímetros hasta casi un kilómetro. Ya que el producto de longitud de onda y frecuencia es igual a la velocidad de la luz, 300 000 km/s, esas frecuencias equivalen desde 100000 a 10^{15} hertz. La luz visible proviene: o bien de cuerpos muy calientes (el sol o una lámpara incandescente) donde las cargas eléctricas están en movimiento intenso, o como luz difusa o reflejada de los objetos que la luz originaria ilumina (la luz de la luna es un ejemplo de ello).

El hecho de que la luz proveniente de sustancias calentadas sea de diferentes colores fue utilizado desde mediados del siglo XIX como un método de análisis físico dentro de la química. Los precursores fueron dos alemanes, el químico *Robert Bunsen* (1811–1899) y el físico *Gustav Kirchhoff* (1824–1887) que en 1859 introdujeron la espectroscopía como auxiliar en los análisis químicos. Lo curioso era que la luz no estaba compuesta por un espectro continuo de longitudes de onda o frecuencias equivalentes. Si se curvaba la luz proveniente de muestras calentadas de diferentes elementos puros se encontraban, en su lugar, bandas angostas de diferentes colores separadas por zonas oscuras, bandas equivalentes a las longitudes de onda y frecuencias que son características de cada elemento.

Durante el curso de los años se acumularon enormes cantidades de datos sobre la longitud de onda y la frecuencia. Bunsen descubrió con la ayuda de la espectroscopía el elemento cesio en 1860 y en 1861 el rubidio. Pero, ¿existía alguna regla detrás de todas esas informaciones?

Era necesario contar con un mago de los números para encontrar la relación entre ellas. El primero fue el matemático suizo *Johann Jacob Balmer* (1825–1898), quien en 1885 descubrió una regularidad detrás de las frecuencias para la luz visible de los átomos de hidrógeno. Las frecuencias estaban en proporción a la diferencia entre los términos $1/2^2$ y $1/m^2$, donde m representaba un número entero mayor que 2.

Una ley más general fue descubierta por el físico sueco de la universidad de Lund *Janne Rydberg* (1854–1919), quien en 1890 describió una fórmula para calcular el *número de onda*, es decir, el valor inverso ($1/\lambda$) de la longitud de onda:

$$1/\lambda = R \times (1/n^2 - 1/m^2) \quad (4.5)$$

en la que R era una constante que se denominó *Constante de Rydberg*. La fórmula de Balmer era por lo tanto un caso especial de la expresión de Rydberg, donde $n = 2$. La fórmula de Rydberg ya había sido modificada por él mismo en una expresión más compleja, cuando estudios más profundos demostraron una estructura fina de las líneas espectrales. En mi opinión es absolutamente suficiente y esclarecedora.

Debido a que la relación entre frecuencia, longitud de onda y velocidad de la luz es $f\lambda = c$, el número de onda puede reemplazarse con f/c . Esto significa que la expresión de Rydberg del número de onda es proporcional a la frecuencia de la radiación. De aquí en más y tal como es común en física, utilizaré la letra griega ν (“ny”) como denominación de frecuencia.

En 1900, el mismo año en que Janne Rydberg publicaba su expresión para el cálculo del número de onda, *Max Planck* (1858–1947) publicaba su teoría acerca del cuántum de energía. Después de la demostración práctica de Hertz acerca de la existencia de la radiación electromagnética y conocer que la radiación térmica y la luz probablemente se generaba mediante oscilaciones de cargas eléctricas en los átomos, era obvio que se buscaran relaciones experimentales entre la energía irradiada de un cuerpo caliente y la frecuencia de la radiación electromagnética.

El físico inglés *John William Strutt* (quien luego sería *lord Rayleigh*, 1842–1919) estudió la radiación térmica en este aspecto. Basándose en la física clásica, arribó a la conclusión de que la energía irradiada de un cuerpo negro, según la teoría, debía incrementarse más allá de los límites si la longitud de onda de la radiación se acercaba a cero. Este hallazgo teórico, que afortunadamente no responde a la realidad, suele llamarse “catástrofe ultravioleta”.

También el físico alemán *Wilhelm Wien* (1864–1928) había estudiado la radiación térmica de un cuerpo negro, pero sin encontrar una teoría que correspondiera a los resultados experimentales. Eso lo logró Max Planck. Su explicación fue revolucionaria y se oponía en apariencia a las leyes de la física clásica. Anteriormente se suponía que las oscilaciones eléctricas de los átomos podían alcanzar mayores frecuencias ante el incremento de la temperatura, pero que todas las frecuencias eran de por sí posibles. Pero tal suposición llevaba a la imposible catástrofe ultravioleta. Para que la teoría correspondiera con la realidad, Planck se vio obligado a suponer que solo ciertas frecuencias eran posibles (tal como Balmer y Rydberg también habían observado) y que los osciladores atómicos no podían enviar energía ininterrumpidamente sino solo en forma de “paquetes de onda” intermitentes con cantidades de energía que eran proporcionales a la frecuencia del oscilador, ν .

Planck llamó cuántum a los paquetes de onda, que según él solo podían transportar una cantidad de energía determinada $h \cdot \nu$. La constante de proporcionalidad h se denomina constante de Planck. Ésta tiene la dimensión energía \times tiempo y tiene el valor $6,62 \cdot 10^{-34}$ joule.segundo. La ley de radiación de Planck indica cómo la emisión de energía por intervalo de

longitud de onda de una superficie negra⁽¹¹⁾ varía con la temperatura absoluta (T) y la longitud de onda (l):

$$dE/d\lambda = \text{const} \times \lambda^{-5} \times \frac{hc^2}{e^{hc/k\lambda T - 1}} \quad (4.6)$$

donde h es la constante de Planck, c la velocidad de la luz y k la constante de Boltzmann (k = 1,381×10⁻²³ joule/grado Kelvin).

Que el espectro de la radiación se indique aquí con la longitud de onda como variable (algo que también se realizó en sus comienzos con los rayos X), se explica por el hecho de que en la espectrografía se registraban longitudes de onda. En realidad es más natural indicar un espectro de energía con la frecuencia de la radiación como variable o, lo que es aún más natural, mostrar como la energía se divide en cuántums de energía de diferente magnitud. Se indica entonces la densidad de probabilidad para los diferentes tamaños de cuántum, lo cual significa no andar con rodeos. Así se realiza en la actualidad en lo referente a rayos X, rayos gamma y la radiación de partículas, pero quizás, por razones de respeto se escribe la ley de radiación de Planck con la longitud de onda como variable.

Si se suman los aportes de energía de los diferentes intervalos de longitud de onda, se descubre cómo la energía irradiada total varía con la temperatura. La energía irradiada es proporcional a la temperatura elevada a la cuarta potencia (E = const × T⁴); la relación se denomina Ley de Stefan—Boltzmann.⁽¹²⁾

La longitud de onda que equivale a la irradiación de energía máxima *por intervalo de longitud de onda* es inversamente proporcional a la temperatura; esta relación se denomina *Ley de desplazamiento de Wien* (los máximos de las curvas espectrales se desplazan hacia longitudes de onda más cortas cuando la temperatura aumenta). Si en su lugar se indica la distribución espectral sobre el intervalo de frecuencia, se obtiene una impresión completamente diferente de la distribución. La intensidad relativa por intervalo de radiación con diferentes longitudes de onda se modifica en la transición de longitud de onda a frecuencia, mientras que esto no es así para la intensidad de las líneas espectrales para la radiación monocromática (es decir, una determinada longitud de onda y frecuencia).

Planck desistió de darle a su teoría un alcance físico. Él afirmaba que solo había introducido el concepto cuántum para lograr que las fórmulas correspondieran con la realidad. Sin embargo la teoría tuvo consecuencias inesperadas.

Todavía no existía una buena hipótesis acerca de la estructura del átomo que no fuera aquella que afirmaba que debía contener osciladores eléctricos. Sin embargo el carácter de ellos fue desconocido hasta 1897. En esa fecha el físico inglés *J.J. Thomson* (1856—1940) descubrió *el electrón*. Ya dieciséis años antes el fisiólogo alemán *Hermann von Helmholtz* (1821—1894) en una conferencia había dicho que era posible que existiesen partículas eléctricas, así como existían partículas de masa atómica. Thomson logró llevar una corriente eléctrica a través de un tubo de vidrio en el cual él había producido suficiente vacío como para que no actuara ninguna molécula de gas. Pudo demostrar que la corriente finalizaba si suministraba un campo magnético. Esto coincidía con la hipótesis de que la corriente era transportada por partículas pequeñas cargadas

(11) Nota del Revisor: Emisión de energía de un cuerpo negro, por intervalo de longitud de onda, de unidad de superficie y de tiempo

(12) En honor a los físicos austriacos *Joseph Stefan* (1835—1893) y *Ludwig Boltzmann* (1844—1906), este último intérprete del término entropía.

eléctricamente. Puesto que esas partículas pueden ser desviadas de su órbita normal tanto con ayuda de un campo electrostático como de un campo magnético, Thomson pudo equilibrar la fuerza eléctrica y la magnética sobre los corpúsculos y luego determinar el cociente e/m entre su carga eléctrica y la masa. Descubrió que el cociente era aproximadamente 2.000 veces más grande para los corpúsculos que para un átomo de hidrógeno ionizado. Esto debía significar que el corpúsculo de la corriente tenía una carga eléctrica mucho mayor que el átomo de hidrógeno ionizado, o lo que supuso Thomson: que tenía una masa mucho menor. En la actualidad consideramos que la carga del electrón es $1,6 \cdot 10^{-19}$ coulomb (As) y que su masa es $9,11 \cdot 10^{-31}$ kilogramos.

El nombre *electrón*, el menor portador de carga eléctrica, había sido propuesto algunos años antes por el físico británico *George Johnstone Stoney* (1826–1911), pero ya hemos visto el origen de la palabra ámbar, en griego. Éste fue el primer material donde se observaron las cargas eléctricas.

Planck no había buscado explicaciones físicas de sus cuántum de energía, pero una demostración de relaciones interesantes había sido ofrecida por el *efecto fotoeléctrico*. Éste ya había sido observado por Heinrich Hertz en 1887, cuando estudiaba las corrientes eléctricas a través de tubos de descarga. Descubrió que la intensidad de corriente aumentaba si iluminaba un electrodo con luz ultravioleta. El mismo efecto había aprovechado Thomson cuando buscaba probar la existencia del electrón.

Fue *Albert Einstein* (1879–1955) quien en 1905 vinculó el cuántum de energía de Planck $h\nu$ con la energía cinética E_k (“k” corresponde a “cinética”) de los electrones que se podían liberar de una superficie después de irradiación con luz. La relación podía escribirse así

$$E_k = h\nu - W \quad (4.7)$$

Se había observado que la energía en los electrones expulsados resultaba inesperadamente independiente de la intensidad de la luz. Sin embargo era mayor en la medida en que la onda de la luz era más corta. Einstein supuso que era la energía del cuántum de luz $h\nu$ la que se transfería al electrón, aunque no totalmente sino que cierta cantidad de energía (W) restante se utilizaba para liberar al electrón.

La aplicación de Einstein de la hipótesis de Planck al efecto fotoeléctrico fue el paso definitivo de la física clásica hacia la física cuántica y el primero en la “era atómica”. Aquel que se sorprenda por el hecho de que Einstein fuera galardonado en 1921 con el premio Nobel por sus estudios del efecto fotoeléctrico y no por las teorías de la relatividad y la famosa relación $E = mc^2$, ha olvidado que difícil e importante fue realmente este primer paso. Para el mundo académico ya resultaba difícil aceptar su desviación de la física clásica y las teorías de la relatividad fueron vistas durante mucho tiempo como caprichos que no habían sido demostrados.

Sin contar todavía con una imagen moderna de los átomos, las propiedades más importantes de la luz, la radiación térmica y las ondas de radio se conocían desde principios del nuevo siglo. De manera desconcertante, la teoría del cuántum de Planck y la descripción de Einstein del efecto fotoeléctrico habían demostrado que incluso si esas radiaciones podían ser descritas como ondulaciones en los campos eléctricos y magnéticos, también podían ser descritas, si la longitud de onda era suficientemente pequeña, como corrientes de paquetes de energía, “partículas de luz”, *fotones*.

Finalicemos este capítulo viendo algunos conceptos y términos comunes para todos los casos en los que algo sale de un punto fuente: pueden ser líneas de fuerza, partículas de masa, energía o una abeja de una colmena.

El flujo representa la cuantía total, la masa, la cantidad, etc que brota. *La densidad de flujo* indica la cuantía equivalente, la masa, la cantidad, por unidad de superficie perpendicularmente a la corriente. Si el flujo total, M , emana de un punto fuente y es esparcido en igual cantidad en todas direcciones y no tiene pérdidas a lo largo del trayecto, entonces la cantidad M va a pasar a través de una superficie esférica alrededor del punto. Puesto que esta superficie ($4\pi r^2$) aumenta con el cuadrado de la distancia, la densidad de flujo a la distancia r va a ser $M/4\pi r^2$ (“ley del cuadrado”). Sobre esta base la densidad de flujo eléctrico (D) alrededor de una carga eléctrica (Q) se escribe

$D = Q/4\pi r^2$, lo cual es otra manera de escribir la ley de Coulomb.

De manera equivalente podemos hablar acerca de *flujo de partículas* y *flujo de energía*, y *densidad de flujo de partículas* y *densidad de flujo de energía*. También podemos necesitar indicar qué es el flujo y la densidad de flujo respectivamente, por unidad de tiempo, es decir, *la tasa de flujo* y *la tasa de densidad de flujo*. Si se trata de flujo de energía por unidad de tiempo, hablamos de *flujo de potencia* y *densidad de flujo de potencia*. Si la segunda magnitud es una densidad de flujo de potencia de la radiación, la llamamos *intensidad* de la radiación, que se indica en watt/m².

Lamentablemente surgen dificultades cuando queremos dar información sobre la luz visible con magnitudes físicas equivalentes. Aquí es donde las magnitudes de la física entran en conflicto con el limitado sentido de la vista del ser humano. Nuestro ojo reacciona solo a la luz dentro de una angosta banda de frecuencias, $0,37 \cdot 10^{15} - 0,75 \cdot 10^{15}$ hertz, equivalente a longitudes de onda entre 4000 y 8000 Å, es decir, 0,4 — 0,8 micrómetros. Esto hace que al establecer el flujo luminoso y la iluminación, es decir, dentro de la *fotometría*, se utilicen magnitudes y unidades que están arraigadas en nuestra comprensión subjetiva de la luz.

Puesto que la luz es un concepto subjetivo, vinculado a la sensibilidad de nuestro ojo, las mediciones del flujo luminoso se basan en la definición de la intensidad luminosa, de la fuente radiante, indicada con la unidad candela (cd). La definición de una candela corresponde a una fuente radiante monocromática que emite una radiación de frecuencia 540,0154 terahertz ($1 \text{ THz} = 10^{12}$ hertz), frecuencia que es aquella a la cual nuestros ojos son más sensibles. Se dice que la intensidad luminosa es de 1 candela si la densidad de flujo de potencia de la radiación emitida hacia el observador es de $1/683$ watt por estereorradián.⁽¹³⁾

Una fuente de luz que tiene una intensidad luminosa de 1 candela en todas direcciones tiene por ello un flujo de potencia total de $4\pi/683$ watt. Se dice entonces tener un flujo luminoso (Φ) de 4π lumen, lo cual también define la unidad de flujo luminoso lumen (lm). Obsérvese que el flujo luminoso es un flujo de potencia, es decir, energía por unidad de tiempo, y no un flujo de energía. Una candela equivale, aproximadamente, a la intensidad luminosa de una vela de estearina o cera, y de allí el nombre.

Iluminación (E) de una superficie es la densidad de flujo luminoso incidente. La iluminación se indica por lo tanto en lumen/m² una unidad que también recibe el nombre de *lux*. Puesto que la intensidad luminosa de una vela de estearina es aproximadamente 1 candela, el flujo luminoso es, desde la luz, de 4π lumen, y la iluminación de una superficie a una distancia de un metro desde la luz es, por lo tanto, de 1 lux.

(13) Un *estereorradián* es la unidad correspondiente a un ángulo sólido y constituye el ángulo sólido delimitado por la fracción $1/4\pi$ de una superficie de esfera unitaria o unidad. Equivale a un ángulo de apertura de 65,56 grados en un cono circular recto.

5 | Darwin y Mendel

Antes de continuar viendo los avances en el campo de la física y la tecnología puede ser oportuno analizar brevemente cómo ha crecido el conocimiento relacionado con la aparición de los seres vivos. Dos señores, *Johann "Gregor" Mendel* (1822—1884) y Charles Darwin (1809—1882), establecieron a mediados del siglo XIX las bases de las teorías sobre la evolución que cambiaron radicalmente la imagen del proceso de la creación.

Hay muchas preguntas que nos formulamos desde pequeños tan pronto como obtenemos suficiente información como para pensar en ellas y antes de haber sido adoctrinados con el pensamiento de otros. ¿Cómo llegamos a este mundo? ¿Y por qué? ¿Por qué somos niños primero y no adultos? ¿Por qué crecemos? ¿Por qué no continuamos creciendo cuando ya somos adultos? ¿Por qué algunos niños se parecen a sus padres? ¿Por qué no son una reproducción exacta de los padres?

Que los seres humanos, los animales y las plantas, generación tras generación, hayan mostrado parentesco y semejanzas a través de los siglos es algo que ha sido evidente desde tiempos inmemoriales. Pero, ¿por qué es esto así y, fundamentalmente, cómo aparecieron los seres vivos? Esta pregunta fue durante mucho tiempo un gran enigma.

Tampoco era difícil comprender que la reproducción de los seres humanos y los vertebrados exigía mantener relaciones sexuales, aún cuando durante mucho tiempo fue un misterio saber qué es lo que realmente sucedía. Ya 4000 años antes de Cristo (que para los seguidores de la Biblia del siglo XIX era la fecha en que Adán y Eva dejaron el paraíso) se sabía que las relaciones sexuales con un hombre eran necesarias para que una mujer pariera a un hijo. Sin embargo, todavía en el siglo XX (según el antropólogo inglés *Bronislaw Malinowski*, 1884—1942), existían culturas primitivas que no comprendían qué papel tenía el hombre en la reproducción.

Aristóteles sabía, por supuesto, que la reproducción de los seres humanos y los grandes animales exigía relaciones sexuales pero creía que los animales podían surgir espontáneamente mediante lo que se denominó "generación espontánea o equívoca" (nota del traductor: abiogénesis). Aristóteles observó la importancia del huevo, en los casos en que los huevos eran tan grandes que él podía ver fácilmente lo que contenían. Algunos animales, como los pájaros y las serpientes, empollaban esos huevos que habían crecido dentro de sus cuerpos. Otros animales, como el hombre, parían crías vivas sin que hubiera huevo alguno. Al observar las gallinas se podía ver fácilmente que era necesario un gallo para que los huevos generaran un pollo. Sin el gallo, los huevos no producían embriones.

Para Aristóteles, los insectos eran una preocupación. Estaba claro que mantenían relaciones sexuales entre ellos y que esto daba lugar a la prole, pero Aristóteles se desconcertaba porque no podía observar huevo alguno. Según Hogben, Aristóteles afirmó:

La mayoría de los insectos engendran crías poco después de la relación sexual. Todos, excepto algunas mariposas y polillas, engendran gusanos. Producen una sustancia dura... que internamente es líquida. Del gusano se forma un animal pero no una parte del mismo, como es el caso de un huevo, sino que crece entero y se convierte en un animal desarrollado ...

Según Hogben, para Aristóteles, las mariposas y las hormigas pertenecen a los animales que se engendraban espontáneamente y continuaba diciendo:

Otros animales no surgen de animales de la misma especie sino que se forman espontáneamente, pues algunos de ellos se forman por el rocío que cae de las plantas...

Algunos surgen del lodo podrido y el estiércol ... Las mariposas surgen de orugas y éstas de las hojas de plantas verdes, especialmente del rábano que algunos llaman col o berza. Las hormigas surgen de nematodos y estos del lodo existente en fuentes y agua corriente que flota sobre el terreno. El lodo que se hunde es blanco, luego negro y finalmente rojo...

La idea de Aristóteles sobre la generación espontánea resultó ser “vigorosa” y cuando yo era niño en la década de 1920 conocí gente que creía firmemente en ella. Sin embargo ya en el siglo XVII había algunos escépticos, entre ellos el investigador italiano *Francesco Redi*, quien hizo un experimento práctico para investigar si los gusanos realmente se formaban espontáneamente en la carne putrefacta. Colocó carne en un tazón que cubrió con una tela de malla. Cuando la carne se pudrió, atrajo a las moscas. Puesto que las moscas no podían llegar a la carne, dejaron sus huevos sobre la tela y allí se convirtieron luego en los “gusanos” que Aristóteles creyó que solo podían surgir de la carne.

Otro escéptico era el médico inglés *William Harvey* (1578–1657), el hombre que en 1628 descubrió la circulación de la sangre. En su último escrito, publicado después de su muerte, afirmó: *omnia ex ovo* (todo surge del huevo). La condición para creer esto eran las posibilidades de observación que ofrecía el nuevo descubrimiento: el *microscopio*. Los microscopios sencillos son conocidos en Holanda a fines del siglo XVI, pero el avance de este instrumento fue el resultado de estudios ópticos realizados por *Johannes Kepler* (1571–1630) en sus esfuerzos por desarrollar los prismáticos para observaciones astronómicas.

Otro gran paso en el camino hacia el descubrimiento de los misterios de la reproducción lo dio el investigador naturalista holandés *Antonie Van Leeuwenhoek* (1632–1723). Él comenzó en 1671 a fabricar excelentes microscopios con aumentos de 500 veces y resolución de 1 micrómetro. Pasarían más de 150 años antes de que se lograra algo mejor.

Sin embargo Van Leeuwenhoek hizo algo más que fabricar microscopios: también los utilizó. Fue un pionero en el estudio de los microorganismos y a través del estudio del esperma descubrió el espermatozoide en 1677. Fue también quien descubrió los glóbulos rojos. Los estudios de van Leeuwenhoek sobre el esperma le permitieron llegar a la conclusión de que gracias a un espermatozoide se podía desarrollar un nuevo individuo.

En 1672 otro holandés, Reinier de Graaf (1641–1673), descubrió el folículo en el ovario, el folículo de Graaf, de donde se va a liberar en la ovulación un ovocito que es expulsado para que tenga lugar la fecundación. Sin embargo creyó que el folículo era equivalente al huevo de los pájaros y que la fecundación debía tener lugar en el ovario. El verdadero óvulo de mamífero que se encontraba en el folículo fue descrito recién en 1827 por el eminente estonio Ernst von Baer (1792-1876). Él era profesor de zoología y anatomía en Königsberg, pero en 1834 se convertiría en profesor de la Academia de Ciencias en San Petersburgo.

A fines del siglo XVII existían dos teorías que competían entre sí: una consideraba que era el óvulo de la hembra el que formaba completamente al nuevo individuo, y el semen del macho solo ponía en marcha el proceso. La otra consideraba que el individuo provenía solo del semen y que la hembra solo funcionaba como terreno fértil para el nuevo ser.

Los “defensores del óvulo” suponían que las características externas del padre heredadas por el hijo se debían a que el padre había causado gran impresión en la madre. Del mismo modo se suponía que las malformaciones tales como los “lunares o manchas” se podían deber a que la madre durante el embarazo se había dejado impresionar por un incendio. Por eso se trataba de proteger a la mujer embarazada de impresiones demasiado peligrosas.

El médico británico *Nehemia Grew* (1641–1712) utilizó el microscopio para estudiar la

estructura de las plantas en un trabajo publicado en 1682, *The Anatomy of Plants*. También estudió la estructura de las flores e identificó a los estambres y los pistilos como los órganos reproductivos de las plantas. Los pistilos eran el órgano femenino y los estambres el masculino. Por eso podía considerarse que el grano de polen cumplía la misma función que los espermatozoides, cuya existencia había demostrado Van Leeuwenhoek cinco años antes. Esto abrió nuevos caminos para la comprensión de la naturaleza de la reproducción, pero pasaría mucho tiempo antes de que Mendel descubriera las leyes más sencillas de la herencia. Sin embargo, comenzaba a quedar en claro que los nuevos individuos heredaban de alguna manera características de ambos padres. En los animales el espermatozoide llevaba el aporte del padre, mientras que el aporte de la madre estaba en el óvulo.

Ya es hora de que nuestro investigador naturalista sueco *Carl von Linné* (o Lineo, como se lo conoce en castellano, nacido en 1707 y fallecido en 1778) aparezca en escena. Teniendo en cuenta que algunos afirmaban que los estambres y los pistilos eran, respectivamente, el órgano masculino y femenino de las plantas fanerógamas, Linné tenía una base para su sistema sexual: pudo clasificar a las plantas según la cantidad de estambres. Linné contribuyó fundamentalmente a establecer una terminología uniforme y una manera de nombrar a las familias y las especies.⁽¹⁾

Ya se habían eliminado muchos mitos acerca de la reproducción. La idea de Aristóteles según la cual las hormigas provenían de nematodos que espontáneamente se formaban en el lodo había sido reemplazada por observaciones más exactas. Del libro de Linné *Rarezas de los insectos* puede citarse lo siguiente:

Véase cómo el mosquito (*Culex*), la efemera, la phryganea (mantis) y la libélula vuelan todo el día sobre el agua y ponen sus huevos, que, incubados en el agua, deben vivir debajo de ella mientras son gusanos. Tan pronto como tienen alas, se ahogan si alguna vez caen en el agua.

La célula como componente de plantas y animales era un concepto desconocido a mediados del siglo XVII. No se habría podido estudiar sin tener acceso al microscopio. Fue el inglés *Robert Hooke* (1635–1703), asistente de *Robert Boyle* (1627–1691) en Oxford el que le dio su nombre. Hooke había construido las bombas de aire que Boyle utilizó y estaba enemistado con Newton. Hooke fue el primero en demostrar que el material biológico, un corcho, estaba construido por pequeñas unidades a las que llamó células.

Sin embargo fueron los botánicos alemanes *Matthias Schleiden* (1804–1881) y *Theodor Schwann* (1810–1882) los primeros que estudiaron más científicamente a las células de plantas y animales. Schwann demostró la semejanza entre las células, independientemente de su origen animal o vegetal y también que todos los tejidos están contruidos por células. Schleiden constató la importancia del núcleo de la célula, escribió poesías bajo el seudónimo Ernst y publicó junto con *Carl von Nägeli* (1817–1891) “*Zeitschrift für wissenschaftliche Botanik*”.

Las diferencias de opinión entre von Nägeli y Schwann ilustran la fuerza que tenían las hipótesis sobre la “generación espontánea”. Schwann se oponía a la teoría de la generación espontánea y von Nägeli la apoyaba. Este último no creía en Darwin y suponía que todas las especies eran inalterables y habían sido creadas tal y como eran.

(1) En el sistema jerárquico que se utiliza para clasificar a las plantas y los animales la clasificación es la siguiente: reino > división (raza para los animales) > clase > orden > familia > género > especie. El lego se sorprende que una “familia” sea un término mayor que un “género”, pero es así. En inglés la clasificación es la misma: kingdom > division (phylum para los animales) > class > order > family > genus (plural: genera) > species .

Un fuerte opositor a la teoría de la “generación espontánea” de las células (*generatio spontanea*) fue el reputado médico alemán y profesor *Rudolf Virchow* (1821—1902). Virchow había estudiado medicina en Berlín, pero se vio obligado a trasladarse en 1849 al Würzburg debido a sus críticas referidas a las condiciones existentes durante una epidemia de tifus. En 1856 regresó a Berlín como docente de una cátedra de patología. Virchow subrayó la importancia de las células y afirmó que son fundamentales para el proceso de la vida del cuerpo. Él luchó contra la vieja patología humoral que afirmaba que las enfermedades eran causadas por trastornos en el balance de los cuatro “líquidos corporales”: la sangre, la mucosidad, la bilis amarilla y la bilis negra.⁽²⁾

Virchow era demasiado sabio como para creer en la generación espontánea. Consideraba que cada célula tiene su origen en otra célula y lo expresaba utilizando las palabras *omnis cellula e cellula* (todas las células provienen de células).

Ahora era evidente que los caracteres podían ser heredados de ambos padres, al igual que también podían adquirirse mediante la enseñanza y el entrenamiento. Pero, ¿podían heredarse los caracteres de la misma manera que se había creído que las impresiones que recibiera la madre durante el embarazo podrían caracterizar al recién nacido? Esta era una idea generalizada durante el siglo XVIII. Era compartida por el biólogo francés *Jean-Baptiste de Lamarck* (1744—1829), un jesuita y noble que se interesó en la zoología y fue profesor en París, a pesar de la Revolución Francesa. Lamarck fue el primero que utilizó la expresión biología.

Lamarck fue el primer y gran representante de la verdadera teoría de la evolución cuando en 1809 tomó distancia de la idea de que las especies eran invariables ¿tal como? originalmente fueron creadas o que repentinamente se modificaron a los saltos.⁽³⁾ Lo que afirmaba era que hay una adaptación de las especies al entorno cuando este cambia, de tal modo que los cambios hereditarios sucesivos hacen que las especies se adapten a lo nuevo. Según Lamarck una modificación habitual en la utilización de diferentes partes del cuerpo podría hacer que las mismas se modificaran a lo largo del tiempo. Un ejemplo que se suele citar al mencionar a Lamarck, es el caso del cuello de la jirafa, que se estira al buscar comida en las coronas de los árboles, y que habría llevado a la modificación de la longitud de esa parte del cuerpo del animal. Del mismo modo una disminución del uso de un órgano llevaría a que fuera insignificante o rudimentario en generaciones futuras. En gran medida la teoría de Lamarck ha demostrado ser correcta, a pesar de que nunca logró llegar a una explicación razonable. Sin embargo, la expresión *lamarckismo* sería mencionada al hablar de las opiniones de sus seguidores que fundamentalmente le dieron importancia a las creencias erróneas de Lamarck (y sus contemporáneos) de que los caracteres adquiridos pueden heredarse. Un ejemplo de nuestros días fue el ucraniano *Trofim Lysenko* (1898—1976), que ganó los favores de Stalin justamente afirmando estas cuestiones.

Las reflexiones acerca de la evolución de las especies existían mucho antes de Lamarck y Darwin. Este último, en el capítulo inicial de “El origen de las especies, hacía referencia a Aristóteles. Darwin escribió en una nota al pie que Aristóteles en su *Physicae Auscultationes* dijo que “la lluvia no cae para que crezca la semilla, como no cae para destruir los granos del campesino cuando están secos.” y continuó citando el pensamiento de Aristóteles:

(2) Algunos vestigios de la patología humoral están presentes hoy cuando alguien menciona el temperamento sanguíneo (de sanguis = sangre), flemático (phlegma = flema), colérico (cholē = bilis-hiel) y melancólico (cholē melaina = bilis negra).

(3) No todos saben que el abuelo paterno de Charles Darwin, Erasmus Darwin (1731—1802), también afirmaba que las especies cambian y se desarrollan como consecuencia de fuerzas internas. Esta opinión puede haber influenciado en alguna medida a su nieto.

¿Qué impide a las diferentes partes del cuerpo tener esta relación casual con la naturaleza? Los dientes, por ejemplo, crecen por necesidad, los incisivos son filosos, adaptados para morder, los molares son planos para masticar la comida; puesto que no fueron hechos para ese objetivo sino que lo son por casualidad. Y de la misma manera para otras partes del cuerpo donde parece existir una adaptación al uso. Por eso, en cualquier momento, todo junto (es decir, todas las partes del todo) ocurren como si estuvieran hechas por algún motivo, y así fueron conservadas, luego se formaron para un objetivo por el azar y lo que no se forma, pasa y todavía sigue pasando. Aquí vemos como Aristóteles insinúa el principio de selección natural y queda demostrado en sus palabras al explicar como se formaban los dientes aunque su comprensión era muy limitada.

Fue justamente Charles Darwin quien daría una mejor explicación de la teoría de la evolución. Darwin provenía de una familia adinerada. Su abuelo materno era el ceramista *Josiah Wedgwood* (1730–1795), su padre era médico y la familia vivía en Shrewsbury en Shropshire, en la región situada entre Inglaterra y Gales.

Después de finalizar la escuela en Shrewsbury, Darwin estudió medicina durante dos años en la universidad de Edinburgo, pero se cansó y se dirigió a Cambridge para cursar estudios en teología en el Christ's College. Él contaba que en las cuestiones económicas era demasiado consentido como para entusiasmarse en sus estudios.

Sin embargo, en Cambridge conoció a un par de investigadores en ciencias naturales, el profesor en botánica *John Henslow* (1796–1861) y el geólogo *Adam Sedgwick* (1785–1873), y emprendió un viaje de estudios a Wales junto con Sedgwick. El interés por la geología que el viaje despertó logró predisponerlo respecto de las teorías que luego presentaría otro geólogo, sir *Charles Lyell* (1797–1875). Lyell publicó durante los años 1830–1833 un libro en tres tomos con el título *Principles of Geology*. Allí él calculó la edad de la Tierra mediante las conclusiones a las que arribó a través de observaciones de los procesos contemporáneos que influían sobre la superficie terrestre. Arribó a la conclusión de que la Tierra debió haber existido durante un enorme período de tiempo, no solo los 4000 años que se solían mencionar en el texto del Viejo Testamento bíblico.

La teoría de la evolución de Lamarck había sido recibida con escepticismo, no solo porque contradecía la teoría de la creación según la cual Dios había creado a todas las especies tal como se las veía entonces sino también por el corto período que se suponía que la Tierra había existido y que no habría sido suficiente para los drásticos cambios de las especies⁽⁴⁾. Los cálculos de Lyell brindaron un espacio de tiempo completamente diferente para la evolución de las especies.

Cuando Darwin volvió de su viaje a Gales con Sedgwick, recibió a través del profesor Henslow una oferta que cambiaría completamente su vida. El bergantín británico *Beagle* navegaría hacia Sudamérica en 1831 bajo el mando del capitán *Robert Fitzroy* (1805–1865) en una vuelta al mundo que comenzaría con mediciones del mar a lo largo de la costa patagónica y de Tierra del Fuego. Le ofrecieron a Darwin acompañarlos como “naturalista”, pero también para ofrecerle al capitán una compañía conforme a su posición social. Durante este viaje que duró cinco años, Darwin realizó las observaciones que a su regreso le permitirían escribir la

(4) Las civilizaciones conocidas se remontaban a 8.000 años A.C. en la Mesopotamia y 6.000 años A.C. en China. Se encontraron restos de *Homo sapiens* de 23.000 años Antes de Cristo en China, donde hallaron restos de *Homo erectus* de aproximadamente un millón de años AC. Hallazgos más antiguos de herramientas hechas de piedra tuvieron lugar en África, construidos hace 2 millones de años por el *Homo habilis*, y restos del *Homo erectus* de más de 1 millón de años AC. También se habían encontrado pinturas en piedra de más de 20.000 años de antigüedad. La edad de la Tierra se estima actualmente en aprox. 5 mil millones de años.

obra que haría época: *The origin of species*, “El origen de las especies”, cuya primera edición se publicaría recién en 1859, veintitrés años después de su retorno. Darwin tuvo condiciones únicas durante el viaje visitando diferentes entornos alrededor del mundo y tuvo acceso a una excelente biblioteca a bordo del barco, lo cual le permitió ampliar sus conocimientos. En la biblioteca tuvo también acceso al primer volumen del libro de geología de Lyell.

A su regreso Darwin se casó con su *prima Emma Wedgwood*, lo cual no empeoró su ya buena situación económica. Esto le permitió vivir como autodidacta el resto de su vida desde la granja Downs en Kent, cerca de Londres. Además los problemas de salud que tuvo después del fatigoso viaje lo hicieron necesario. Aquí trabajó con su inmenso material de observación tras cinco años de dar la vuelta al mundo y comenzó a esbozar su teoría sobre el origen de las especies. En 1844 ya tenía una primera versión pero no la publicó. Sin embargo permitió que algunos investigadores interesados la vieran, entre ellos Charles Lyell, quien lo alentó a completar el manuscrito para que luego fuera impreso. Darwin le escribió a sus amigos: “Estoy casi convencido (al contrario de lo que pensaba en un principio) que las especies no son (esto es como reconocer un asesinato) inmutables.”

Se puede comprender el creciente temor de Darwin. En su época la interpretación literal de la Biblia era algo común y la mayoría de la gente de su mundo cultural era religiosa. Una teoría que difería de la teoría de la creación de la Biblia sería provocativa y ofendería a muchos, mucho más de lo que podamos imaginarnos.⁽⁵⁾

En 1858, antes de que Darwin alcanzara a finalizar su libro, recibió un manuscrito de *Alfred Wallace* (1823–1913), un investigador inglés que se encontraba en viaje de investigación en las Indias Orientales, donde residió entre 1854 y 1862. Wallace le pidió a Darwin que leyerá su trabajo y luego se lo enviara a Lyell si lo deseaba. Darwin consideró que Wallace también tenía una teoría sobre el *origen de las especies* que en muchos aspectos coincidía con su propia visión. Darwin dudó en publicar su libro. Sin embargo Lyell y otros lo convencieron de escribir rápidamente un resumen de sus resultados y entregarlo junto con el trabajo de Wallace a la Sociedad Linneo de Londres. Los dos aportes fueron impresos bajo el mismo título, reconociendo tanto a Darwin como Wallace como los autores en el *Journal of the Linnean Society* 1858 (volumen 3). Al año siguiente Darwin completó su gran obra *On the Origin of Species by Means of Natural Selection* (1859). Se imprimieron 1.250 ejemplares y puesto que las notables opiniones de Darwin se habían esparcido con anterioridad toda la edición se agotó de inmediato, en cuanto el libro estuvo disponible a la venta el 24 de noviembre.

Los trabajos científicos suelen ser impenetrables para el lego debido a lo inaccesible del tema y la cantidad de términos técnicos, el libro de Darwin es una excepción y puede leerse de corrido incluso por alguien no iniciado en su temática. Además es fascinante seguir su razonamiento.

Durante su viaje, Darwin observó el “derroche” de la naturaleza al permitir la desaparición de individuos recién nacidos de muchas especies. Incluso para especies con poca descendencia, la naturaleza puede “derrochar”, pero en ese caso se pierden gametas.

Darwin estaba también impresionado por *Thomas Malthus* (1766–1834) y su tesis principal en *An essay on the principles of population, as it affects the future improvement of society*, un escrito que fue anónimo cuando se publicó en 1798 pero que se publicó en su versión completa en 1803. Malthus había señalado que el incremento de la población avanzaba más rápidamente que el crecimiento de las posibilidades de manutención. Darwin consideraba que

(5) Quizá debería cambiar de idea: En un artículo del periódico sueco Dagens Nyheter del 19 de enero de 1995 se afirma que según una reciente encuesta de Gallup, el 47% del pueblo estadounidense cree que Dios creó al ser humano más o menos como es hoy y que esto sucedió en algún momento durante los últimos 10.000 años!

mediante la lucha por la supervivencia se generaba una presión selectiva que era general y válida para todas las especies.

Si surge una variación en las propiedades de una especie, los individuos que deberían salir airoso serían aquellos que bajo estas circunstancias tuvieran los caracteres más apropiados. Esos caracteres de la especie serían con el tiempo más representativos, de tal manera que la especie en su conjunto se adaptaría mejor a un nuevo entorno o a las condiciones de vida modificadas. En la lucha por la vida sobrevivirían aquellos que mejores condiciones tuvieran bajo las circunstancias imperantes. Darwin suponía que esos caracteres eran hereditarios. Si todos los individuos eran idénticos, el azar decidiría quién sobreviviría. Con la aparición de diferentes cualidades la selección natural beneficiaba a los más adecuados. Los individuos con cualidades menos ventajosas tendrían menor probabilidad de reproducir los caracteres desfavorables.

En su libro, Darwin dio muchísimos ejemplos que apoyaban su teoría, pero a veces extrajo las mismas conclusiones erróneas que Lamarck: a saber, que un uso reducido (“disuse”) de un miembro o un órgano llevaría a su atrofia al heredarse. Escribió, por ejemplo, en el capítulo quinto:

Creo que la casi absoluta ausencia de alas en muchos pájaros que habitan en la actualidad o durante el último tiempo en algunas islas oceánicas donde no hay depredadores ha tenido lugar por no necesitarlas.

El “disuse” no parece ser actualmente una explicación probable. Una base de selección más probable es la descrita por *Rachel Carson* (1907–1964) en su libro *Havet* (El mar) con las siguientes palabras.

La pérdida de la capacidad de vuelo, incluso hasta las mismas alas (los pájaros moa no las tenían) es el resultado habitual de la vida en la isla. Los insectos de pequeñas islas ventosas son despojados con frecuencia de su capacidad de volar. Los que las conservan corren el riesgo de ser arrastrados por el viento hasta el mar.

Él no sabía qué era lo que estaba detrás de la variación de cualidades que podía observar. Darwin probó incluso la hipótesis de Lamarck, según la cual los caracteres adquiridos podían heredarse y que esto contribuía a explicar el amplio espectro del material existente y disponible para la selección. La especulación de Darwin sobre esta cuestión es conocida como Teoría de la Pangénesis. Según esta teoría todas las células del cuerpo con partículas pequeñas, las gémulas, contribuyen a la formación de las células germinales, las cuales darían la información sobre los caracteres del cuerpo en detalle. De esta manera se obtendría información sobre los caracteres adquiridos para que estos pudieran heredarse.

El *neodarwinismo*, representado por el zoólogo alemán August Weismann (1834–1914), rechazaba esta hipótesis. Weismann afirmó que hay un camino directo desde el óvulo fecundado hasta las células germinales del nuevo individuo sin la influencia de las células somáticas. Esta resultó ser una hipótesis correcta. La teoría de la herencia de los caracteres adquiridos tenía, sin embargo, muchos seguidores, entre ellos el ingeniero inglés y filósofo *Herbert Spencer* (1820–1903), que creía en una teoría de la evolución que implicaba un progreso constante. Spencer amplió la teoría de la evolución de Darwin, extendiéndola a la evolución de la sociedad, un polémico “socialdarwinismo” en el que Spencer introdujo la expresión “survival of the fittest”.

Darwin supuso que el desarrollo biológico a través de la selección natural se realizaba fundamentalmente a través de un número de cambios insignificantes en lugar de cambios repentinos y violentos, a los que llamó “sports”.⁽⁶⁾ Sin embargo era difícil explicar cómo la naturaleza podía proporcionar los caracteres nuevos necesarios para hacer individuos competitivos en un entorno exterior modificado. La herencia mendeliana y las mutaciones espontáneas eran todavía conceptos desconocidos.

La teoría de la evolución dejaba entrever que el ser humano era una especie entre otras y quizá tenía el mismo origen común que los “animales desalmados”. Este pensamiento era casi herético, ya que se decía que el hombre había sido creado a semejanza de Dios. Darwin dudó durante mucho tiempo antes de desarrollar más en detalle esta consecuencia de su teoría de la evolución. Recién en 1871 publicó su trabajo *The Descent of Man* (“El origen del hombre”).

Fueron muchos los que se indignaron ante la posibilidad de que el ser humano fuera considerado como mamífero, pero perteneciente a los *Primates* y por lo tanto pariente de los monos. Esta indignación todavía vive en las protestas contra la mención de la teoría de la evolución en las escuelas, por ejemplo, en los Estados Unidos. Yo mismo casi fui linchado por mis compañeros en la escuela cuando respondí una pregunta de la maestra: “¿Pueden dar ejemplos de mamíferos?” “El ser humano”, contesté. ¡“No somos monos!!” gritaron enojados mis compañeros en el siguiente recreo escolar.

Casi al mismo tiempo que se editaba el Origen de las Especies de Darwin, otro investigador comenzó a realizar una serie de experimentos metódicos para responder, de una vez por todas, a la cuestión relacionada con la existencia de la *generación espontánea*. Se trataba del bioquímico francés *Louis Pasteur* (1822—1895), quien en ese entonces era profesor en la École Normale de París. Pasteur había demostrado que la levadura no era, tal como se creía hasta entonces, un proceso químico sino que era causado por microorganismos. Alrededor de 1860 comenzó a investigar sistemáticamente si existía alguna base para la teoría de la *generación espontánea*. Logró demostrar que los microorganismos que originaban la levadura o la putrefacción de los alimentos no surgían de ellos sino que estaban en el aire. Por eso se podían conservar los alimentos más tiempo si se los mantenía cerrados herméticamente. También se podían matar los microorganismos con ayuda del calor. El descubrimiento de Pasteur fue de gran utilidad para los vitivinicultores que antes se veían afectados por grandes pérdidas debido a los hongos de la levadura que atacaban al vino. Pasteur demostró que el vino se conservaba si primero era calentado a aproximadamente 55°C y que este calor, que luego se llamaría *pasteurización*, no afectaba al sabor del vino.

Mientras Pasteur refutaba la teoría de la *generación espontánea* y Darwin elucubraba sobre el origen del ser humano, la ciencia genética tomaba forma en un convento en Brünn, en checo Brno. El hombre que le dio forma fue el monje agustino *Gregor Mendel*. Él había nacido en 1822 en Heinzendorf en Mähren (entonces perteneciente al imperio austríaco) y fue bautizado con el nombre de Johann. Después de cursar sus estudios de nivel secundario en Troppau (en checo, Opava) su educación estuvo en dificultades debido a los problemas económicos generados por la enfermedad de su padre. Estudió ciencias naturales entre 1841 y 1843 en la universidad de Olmütz (en checo, Olomouc), seis millas al nordeste de Brünn, pero tuvo que trabajar dando clases particulares, algo que lo agotaba sobremanera. Las dificultades hicieron que Johann abandonara los estudios universitarios en 1843 y solicitara el ingreso al convento de Königin en Brünn, donde cambió su nombre por el de Gregor. Recibió las órdenes en 1848.

(6) Compárese “sports” en, por ejemplo, el cultivo de la rosa.

Al convertirse en monje Mendel no abandonó la posibilidad de continuar sus estudios en ciencias naturales. El abad del convento estaba interesado en ellas y se habían realizado experimentos con cultivos antes de que Mendel llegara. Mendel tuvo la oportunidad en 1846 de participar en la enseñanza sobre cultivos y fertilización cruzada artificial entre diferentes plantas, a cargo del profesor *Franz Diebl*. Luego de recibir las órdenes, Mendel trabajó como profesor entre 1848 y 1851 y luego estudió tres años en la universidad de Viena, donde aprendió el método científico dictado por el profesor de física *Christian Doppler* (1803—1853), el hombre que en 1842 había descrito *el efecto doppler*. El profesor de *fisiología Franz Unger* (1800—1870), quien también era director del jardín botánico, lo alentó a estudiar las causas de la variación de diferentes especies de plantas. Unger proponía que podrían surgir nuevas formas a través de la “combinación de elementos en las células”. Entre 1854 y 1868 Mendel fue profesor en la escuela secundaria de Brünn. En 1868 fue nombrado abad del convento de Königin en Brünn.

No se trataba de alguien sin estudios, un monje aislado del mundo que trabajaba en la fecundación cruzada en el convento. Era imaginativo y sus experimentos eran pensados y realizados minuciosamente. Sus interpretaciones de los resultados se caracterizaban por su lógica perspicaz.

Sin embargo, los resultados de las investigaciones de Mendel no tendrían un impacto inmediato. Los resultados fueron presentados muy tímidamente el 8 de febrero y el 8 de marzo de 1865, en la asociación de naturalistas de Brünn (que él mismo había creado, junto con otros). Al año siguiente, en 1866, se publicó un informe resumido: *Versuche über Pflanzenhybriden*, incluido en las publicaciones de la asociación fechado en 1865). El informe fue enviado a aproximadamente cien bibliotecas pero no llamó la atención. Mendel recibió 40 ejemplares, y uno de ellos lo envió a Carl von Nägeli en Munich, quien así tomó conocimiento de los descubrimientos de Mendel sobre la regularidad en las variaciones de los caracteres de los híbridos.

Mendel había realizado sus fecundaciones cruzadas en especies (*Pisum sativum*). Von Nägeli había realizado experimentos de cruzamiento con el género de plantas *Hieracium* y no había encontrado ninguna variación en los cruces. Por eso creía que los resultados de Mendel eran un caso especial que solo era válido para esas especies y le envió a Mendel semillas y plantas de *Hieracium*. Mendel experimentó con cruzamientos de *Hieracium* y tampoco encontró variaciones. Pero el caso especial ¿era el de von Nägeli o el de Mendel? Mendel sospechaba que se trataba del caso de Nägeli, y presentó la explicación en la asociación de naturalistas en una conferencia en 1869. Ahora sabemos que Mendel tenía razón. La familia de los *Hieracium* es fundamentalmente *apomíctica*, es decir, se reproduce asexualmente. En las hierbas como el panadero (taraxacum) y *hieracium* las semillas pueden formarse sin fecundación y en los casos en que sucede no hay ninguna condición de variación, algo que recién sucede cuando hay fecundación.

Las dos versiones de las tres conferencias de Mendel en las publicaciones de la asociación de naturalistas de Brünn constituyen el único material impreso en el cual Mendel describe su trabajo. Él no dejó ni anotaciones ni cartas. La única carta que se conserva es la que le escribió a von Nägeli.

Mendel conocía el libro de Darwin, pero éste probablemente no conocía el trabajo de Mendel. Para Mendel, un biólogo experimental, la teoría de la evolución de Darwin era algo fuera de lugar. Para la filosofía de Darwin conocer los descubrimientos de Mendel habría podido significar mucho, aun si no daba respuesta a todas sus preguntas.

¿Qué era lo que realmente había descubierto Mendel? Todavía no se sabía nada sobre la naturaleza del núcleo de las células ni sobre el papel de los cromosomas como portadores del patrimonio genético. Mendel debía remitirse a observar los caracteres de sus plantas de ar-

vejas. Después de haber experimentado durante un par de años decidió estudiar 7 caracteres fácilmente identificables, a saber:

1. La forma de las arvejas maduras: Lisas o rugosas
2. La coloración del albumen de la semilla: Amarillo o verde
3. La coloración del tegumento: Blanco o gris cobrizo
4. La forma de la vaina: Uniforme sin estrangulamiento o con estrangulamiento entre granos
5. La coloración de la vaina: Amarillo o verde
6. La posición de las flores en el tallo: Flores axiales o terminales
7. La altura del tallo: Alto ($6'-7'$) o bajo ($3/4' - 1\ 1/2'$)

Mendel constató primero que una fecundación entre plantas que demuestran tener los mismos caracteres en lo referente a algunos de esos puntos también da descendientes que siempre tienen los mismos caracteres. Si el carácter en algún punto es diferente entre la plántula y la planta polinífera, la descendencia será un híbrido con un nuevo carácter. En algunos casos parece, sin embargo, que el híbrido obtiene uno de los caracteres originales que Mendel designó como dominantes, mientras que el otro carácter no tiene éxito antes de que aparezca en algunos ejemplares en generaciones posteriores. Mendel lo llamó entonces recesivo.

Si en un par de caracteres (por ejemplo lisos o rugosos) uno de los caracteres es dominante y el otro recesivo, Mendel los designó con una letra mayúscula o minúscula respectivamente, por ejemplo "A" y "a". Si la fecundación transfiere caracteres al azar, hay en ese caso cuatro posibilidades de combinación de los caracteres a través de las semillas y el polen: AA, Aa, aA y aa, es decir, la relación 1:2:1 entre el carácter "A", los caracteres híbridos Aa, aA y el carácter "a". En la siguiente generación la relación será 6:4:6 (es decir 3:2:3), en la siguiente 28:8:28 (es decir 7:2:7), y en la generación n $(2n-1):2:(2n-1)$. Para la décima generación será $(2n-1) = 1.023$, señaló Mendel. Si cada planta de cada generación da 4 semillas, se obtendrán entonces 2.048 plantas, de las cuales en promedio tendrán 1.043 con el carácter "A" 1.043 con el carácter "a" pero solo 2 híbridos (Aa o aA)⁽⁷⁾.

Mendel continuó luego describiendo un experimento donde las letras "A" y "a" designaban la forma de las semillas ("A" para las lisas y "a" para las rugosas), y "B" y "b" a la coloración del albumen de la semilla ("B" para la amarilla y "b" para la verde). Él realizó la fecundación de tal modo que los caracteres dominantes "A" y "B" provinieran de una plántula y los recesivos "a" y "b" de una planta polinífera. Las semillas de las plantas obtenidas fueron cultivadas el año siguiente y su progenie mostró 9 formas diferentes con una distribución relativa de acuerdo con la expresión:

$$AB + Ab + aB + ab + 2 A(Bb) + 2 a(Bb) + 2 (Aa)B + 2 (Aa)b + 4 (Aa)(Bb)$$

Mendel escribió: "No hay duda de que esta serie desarrollo es una serie de combinaciones en la cual las series desarrollo de los caracteres "A" y "a", "B" y "b" "están vinculados". La serie completa se obtiene por la combinación⁽⁸⁾ de las expresiones:

$$\begin{aligned} A + 2 (Aa) + a \\ B + 2 (Bb) + b \end{aligned}$$

(7) Transcripción textual del trabajo original de Mendel.

(8) Nota del Revisor: Es decir por el producto $[A + 2 (Aa) + a] \cdot [B + 2 (Bb) + b]$ de los polinomios citados.

Mendel continuó mostrando que una combinación de tres caracteres “A”, “a”, “B”, “b” y “C”, “c”, daban frecuencias relativas para la progenie de los híbridos equivalente a una combinación de las expresiones

$$A + 2 (Aa) + a$$

$$B + 2 (Bb) + b$$

$$C + 2 (Cc) + c$$

En otras palabras, como él lo expresó, “las proporciones de cada uno de los pares de caracteres diferentes en el híbrido es independiente de las demás diferencias entre las plantas de origen”.

Si n representa la cantidad de diferencias en ambas plantas de origen, la cantidad de relaciones constantes, según Mendel, es 2^n . Mendel continuó afirmando (según Ernst Nilsson en su obra *Ärftlighetslärans urkunder*):

Todas las relaciones constantes que son posibles en el *Pisum* mediante combinación de los 7 caracteres expuestos también se han obtenido mediante cruzamiento repetido. Su número está dado por $2^7 = 128$. Así está también demostrado que los caracteres constantes que aparecen en diferentes formas de una familia de plantas, pueden incluir todas las relaciones posibles según las reglas de la combinación, mediante la fecundación artificial.

Mendel tenía razón, pero no del todo. El par de caracteres que se observa no puede ser conducido por el mismo cromosoma, pero eso Mendel no lo sabía.

Recién a fines del siglo XIX, se prestó atención a las observaciones y conclusiones de Mendel. Mientras tanto la investigación biológica había realizado avances. En 1875 el joven zoólogo alemán *Oscar Hertwig* (1849–1922) demostró a través de estudios del óvulo del erizo de mar que la fecundación implicaba la fusión de la célula sexual masculina y la célula sexual femenina. Gracias a la tecnología microscópica se pudo observar en la división celular las estructuras filamentosas en el núcleo de la célula. El anatomista alemán *Walter Flemming* (1843–1905), profesor en Kiel en 1879, pudo mostrar que esas estructuras, *los cromosomas*, se empalmaban a lo largo inmediatamente antes de una división celular y cada una de las dos nuevas células tenían igual número de cromosomas que la célula madre. El especialista en embriología, el belga *Édouard van Beneden* (1846–1910), profesor de la universidad de Liège, mostró en 1887, luego de estudiar el ascáride del caballo (que solo tiene 4 cromosomas) que el óvulo fecundado poseía la mitad de los cromosomas que provenían del óvulo de la madre y la otra mitad del espermatozoide del padre. Esas células germinales se han formado mediante una división celular especial, *meiosis*, de tal modo que solo poseen la mitad del número normal de cromosomas. Luego de la fecundación se obtiene el número normal de cromosomas.

Las observaciones de van Beneden confirmaron los resultados de Mendel, que significaban que el óvulo fecundado solo heredaba uno de los posibles caracteres de cada uno de los padres. En 1888 los cromosomas recibieron su nombre. Su creador fue *Wilhelm Waldeyer* (1836–1921), al ver que su coloración permitía estudiarlos en el microscopio.

Pasaría mucho tiempo antes de que Mendel fuera redescubierto. Eso sucedería recién después del cambio de siglo, cuando tres investigadores realizaron observaciones semejantes. El que se llevó los mayores créditos y honores de haber redescubierto las leyes mendelianas de la herencia y los escritos de Mendel fue el botánico alemán *Carl Correns* (1864–1933), quien era

profesor en Tübingen en 1900 para luego ser el primer director del instituto Kaiser Wilhelm de biología de Berlin-Dahlem.

Con el nuevo siglo la genética ingresó como una ciencia que volvió a nacer. Se conocían los cromosomas en los núcleos de la célula y se sabía que de alguna manera respondían a la ley de la herencia y que se transmitían de manera casual tanto de la madre como del padre. Todavía nada se sabía sobre el ácido desoxirribonucleico ni sobre el código genético.

6 | Los rayos del profesor Röntgen

Cuando William Gilbert publicó en 1600 su gran obra sobre magnetismo y, en ese contexto distinguió entre el fenómeno eléctrico y el magnético, llamó a algunas sustancias con el nombre de “eléctricas” pero él no usó la palabra “electricidad”. Estaba fundamentalmente interesado en la acción de la fuerza eléctrica y no tenía idea alguna sobre la electricidad como algo que podría existir en los cuerpos eléctricos y desde ellos poder fluir hasta otros cuerpos.

Durante el siglo XVII se comenzó a experimentar por primera vez con el vacío, se apreciaron nuevos aspectos del fenómeno eléctrico. *Otto von Guericke* (1602—1686), uno de los cuatro alcaldes de Magdeburg, logró a mediados del siglo XVII crear bombas que extrajeran el aire de grandes contenedores. Él fue el primero que pudo realizar vastos experimentos con el vacío. Ante el parlamento de Regensburg, en 1654, von Guericke pudo mostrar dos hemisferios de cobre que mediante bordes esmerilados podían unirse en vacío. Al extraer el aire del contenedor resultó muy difícil separar los hemisferios; se necesitaron 8 caballos que tiraran de cada hemisferio y cuando se separaron, se escuchó un fuerte estallido cuando el vacío fue reemplazado por aire.

El inglés Robert Boyle continuó desarrollando la bomba de vacío para poder estudiar el fenómeno en situaciones con muy baja presión. En 1675 el abad *Jean Picard* (1620—1682) observó fenómenos lumínicos extraños en el vacío por encima de la columna de mercurio en los barómetros con los que trabajaba. Ni Boyle ni von Guericke, ambos con experiencia en electricidad por frotación, conocieron las observaciones realizadas por el abad Picard. Sin embargo von Guericke prestó atención al fenómeno lumínico en el aire cuando llevaba su mano hacia su aparato para generar electricidad por frotación. La mano parecía “iluminar tal como el azúcar cuando se parte” escribió von Guericke.

El inglés *Francis Hauksbee* (aprox. 1660—1713) publicó sin embargo el resultado de investigaciones profundas de “la luz del barómetro”. Extrajo el aire de un tubo de vidrio que contenía mercurio. Cuando agitó el tubo, éste se iluminó. Hauksbee adivinó que era la frotación del mercurio contra el vidrio lo que había generado el fenómeno lumínico y que éste era de naturaleza eléctrica. Después demostraría que la presencia de mercurio no era necesaria. Logró también generar el fenómeno lumínico si frotaba con la mano una vasija de vidrio sin mercurio y luego extraía rápidamente el aire.

Hauksbee descubrió también que si colocaba la mano contra un globo de vidrio que rotaba rápidamente, lo convertía en algo tan eléctrico que salían chispas cuando acercaba un dedo al vidrio. Él pudo constatar que “algo” parecía salir de un cuerpo cargado eléctricamente. Cuando Stephen Gray en 1729 informó sobre sus experimentos con la transmisión de electricidad a través de alambres conductores, nació la idea de que la “electricidad” quizá era algo que podía ser transportado entre cuerpos cargados si los vinculaban con alambres. Era como si se tratara de algún líquido de algún tipo que no se podía pesar ni ser visto directamente de otra manera que no fuera a través de los fenómenos lumínicos que podía generar.

Nuestro amigo Dufay, con sus experimentos ante la corte francesa, consideraba que debían existir dos clases de electricidad. Él escribió: “Lo que es característico de esas dos electricidades es que se repelen a sí mismas pero se atraen mutuamente”.

Benjamin Franklin (1706—1790), interesado en las ciencias naturales y cuya aportación más famosa en el campo de la electricidad es el invento del pararrayos, afirmaba también que el estado eléctrico de los cuerpos podía ser de dos clases: a una de ellas la describió como un excedente y a la otra como un déficit de electricidad. Franklin afirmaba que la electricidad está normalmente distribuida de manera uniforme y por eso la carga de un cuerpo debe implicar siempre “la falta de electricidad” en otro. Tanto la descripción de Dufay como la de Franklin

coinciden con nuestra concepción contemporánea sobre la existencia de cargas eléctricas “positivas” y “negativas”.

El 2 de mayo de 1800 el cirujano inglés *Anthony Carlisle* (1768—1840) descubrió junto con el químico *William Nicholson* (1754—1815) que el agua puede descomponerse en hidrógeno y oxígeno bajo la influencia de la electricidad. A partir de ese momento los químicos comenzaron a interesarse en los fenómenos eléctricos, lo cual significó una mayor comprensión del transporte de cargas eléctricas.

En Suecia fue el famoso electroquímico *Jöns Jacob Berzelius* (1779—1848) y en Inglaterra sir *Humphry Davy*. Cuando la corriente de Ampère y las leyes básicas de la electricidad se hicieron conocidas durante la década de 1820 (por ej., la ley de Ohm, en 1826), se crearon mejores condiciones para los experimentos cuantitativos. Faraday descubrió en 1833 que en una corriente eléctrica entre dos electrodos en una solución salina se pueden separar diferentes elementos en cantidades que están en una relación constante con la cantidad de electricidad (expresada en ampère-segundos, es decir, en coulomb) que pasa a través del conductor eléctrico conectado.

Las observaciones de Faraday posibilitaron por primera vez un modo de contemplación atomístico de la carga eléctrica. Si la misma cantidad de electricidad transfiere siempre igual cantidad de equivalente gramo (el peso equivalente es igual al peso molecular dividido por la valencia química) de un elemento en la electrólisis y si se sabía cuántas moléculas hay en una molécula gramo, se podía investigar si todas las moléculas transportaban igual número de cargas eléctricas o posiblemente múltiplos de cierta unidad de carga. La cantidad de moléculas por molécula gramo está establecida por *el número de Avogadro*, que es $6,02214 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ (o por cm^3 de gas⁽¹⁾ con ayuda del número de Loschmidt, $2,68676 \cdot 10^{19(2)}$).⁽³⁾ Con la hipótesis de Faraday se puede calcular cuántas moléculas actúan en el transporte de una cantidad dada de electricidad y por lo tanto la magnitud de electricidad correspondiente a cada molécula. Faraday llamó a las partículas de la molécula iones (del griego ion = el que va).

Este cálculo fue realizado por primera vez por George Stoney en 1874. Presentó su tesis en Belfast con el título *On the physical Units of Nature*, pero recién fue publicado en 1881. En otra tesis, diez años después, Stoney escribía lo siguiente (según Liljeström):

Una carga de este tamaño está unida con cada enlace de unión en el átomo químico. Por consiguiente deberían existir varias cargas como esas en un átomo químico y se ven al menos dos en cada uno. Esas cargas, que bien podrían llamarse “electrones”, no pueden eliminarse del átomo pero están ocultas cuando los átomos químicos se unen.

Al hablar de “átomos químicos” Stoney se refería más bien a los iones, y cuando hablaba de “como mínimo dos cargas” debe haberse referido a una carga positiva y otra negativa que se neutralizaban entre sí.

El físico alemán *Rudolf Clausius* (1822—1888) buscó explicar la división de los compuestos químicos en sus componentes en la electrólisis, y supuso que las moléculas en alguna

(1) Gas ideal a 0°C y 1 atm

(2) El valor recomendado del número de Loschmidt es $2,6867774 \cdot 10^{19}$. Ver Peter J. Mohr, Barry N. Taylor and David B. Newell (April 2008). “CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2006” <http://physics.nist.gov/cuu/Constants/RevModPhys_80_000633acc.pdf> *Reviews of Modern Physics* 80 (2): 633–730

(3) El número de Loschmidt fue calculado por el físico austriaco Joseph Loschmidt (1821—1895) sobre la base de la ley enunciada en 1811 por el físico italiano Amadeo Avogadro (1776—1856) y que dice que cada molécula gramo, independientemente de la materia, contiene la misma cantidad de moléculas.

medida aparecen divididas ya en la solución salina. Esta idea fue la base de la Teoría de la Disociación presentada en la lectura de una tesis en Uppsala en 1884 por el sueco *Svante Arrhenius* (1859—1927).

La tesis de Arrhenius no fue bien recibida, ya que era demasiado audaz. Él supuso que algunas de las moléculas de sal en una solución acuosa se descomponen. Esto no parecía increíble teniendo en cuenta que la constante dieléctrica del agua es de 80 aproximadamente, por lo que podía esperarse que las fuerzas eléctricas disminuyeran hasta 1/80 de lo que habían sido en el aire. Arrhenius supuso luego que no era muy probable que las partículas de las moléculas se volvieran a unir si la dilución era grande. En soluciones concentradas deberían existir, sin embargo, muchas moléculas reconstituidas. Arrhenius dijo por eso que un número de moléculas de sal se disociaban en iones cargados eléctricamente, que gracias a su carga eléctrica son atraídos hacia los electrodos en la electrólisis. En 1907 el mismo Arrhenius escribió en su tesis (según Liljeström):

Las investigaciones pormenorizadas de la capacidad conductora orientaron mi atención luego a que se debe considerar en primer lugar a la partícula conductora de las moléculas de sal. Durante la lectura de la tesis doctoral el oponente, el Dr. Å.G. Ekstrand⁽⁴⁾ dijo, como circunstancia agravante, que yo había supuesto que las moléculas de sal conductoras se desintegrarían en iones. El presentimiento de que la mayoría de los químicos estaría de acuerdo con esta objeción a mi tesis, hizo que me esforzara lo menos posible en poner de manifiesto la disociación. De esa manera la teoría de la disociación tardó tres años en consagrarse.

Faraday estudió también (1838) en profundidad qué sucedía en una descarga eléctrica con baja presión, es decir, los fenómenos que cien años antes habían sido estudiados por Picard, von Guericke, Boyle y Hauksbee. Si una fuente de tensión eléctrica se conecta a dos electrodos en un tubo de vidrio con baja presión, se observa un fenómeno lumínico, una “incandescencia” que se extiende junto al cátodo y extensamente frente al ánodo. Entre las áreas iluminadas existe un área oscura que suele llamarse el *espacio oscuro de Faraday*.

Si se disminuye la presión aún más el espacio oscuro se desplaza cada vez más cerca hacia el ánodo, de tal modo que la columna de luz frente al ánodo va desapareciendo lentamente. Al mismo tiempo se extiende cada vez más la luz del cátodo en dirección hacia el ánodo y entonces el área más cercana al ánodo se oscurece. Cuando la presión es muy baja el oscurecimiento se expande y llena todo el tubo, cuyas paredes de vidrio se iluminan con un débil brillo fluorescente.

Estudios más profundos relacionados con el tubo de descarga fueron posibles gracias a uno de los inventos prácticos más importantes de Faraday, el transformador eléctrico. En su forma más sencilla el transformador está compuesto por dos bobinas conductoras alrededor de un núcleo de hierro cuya función es incrementar la inducción magnética. La bobina primaria tenía pocas espiras e indujo una corriente eléctrica cuando se la conectaba a una batería galvánica. Al conectar y desconectar la bobina primaria podía generarse un campo magnético variable concatenado por la bobina secundaria. Si ésta estaba compuesta de muchas vueltas de alambre se inducía una elevada tensión eléctrica entre los extremos de la bobina. El cierre y la interrupción de la corriente a través de la bobina primaria se realizaban primero con la ayuda de un contacto de resorte accionado contra un engranaje que rotaba y después con un resorte

(4) Åke Ekstrand (1846—1933) era profesor de química, director de la Sociedad de Químicos y en 1907 jefe de ingeniería de Kontrollstyrelsen, una institución que entre 1919 y 1971 ejerció la supervisión de la aplicación de la legislación que regulaba el consumo de alcohol.

vibrando de la misma manera que en los timbres eléctricos comunes.

Cuando en la actualidad escuchamos hablar sobre transformadores eléctricos, pensamos de inmediato en transformación elevadora o reductora de tensiones eléctricas alternas. Sin embargo en el transformador de Faraday la corriente pasaba a través de la bobina primaria siempre en la misma dirección y la tensión sobre la bobina secundaria era una tensión continua pulsante. Esos transformadores de altas tensiones pulsantes se denominan *inductorium*, y fueron instrumentos muy útiles cuando se quisieron investigar los fenómenos lumínicos eléctricos en gases con baja presión. Una construcción particularmente famosa fue *la bobina de Ruhmkorff*, cuya bobina secundaria tenía un gran número de espiras de alambre conductor (¡en total más de 100 Km. de longitud!) y generaba tensiones tan altas que podían generar chispas enormes.

El emperador Napoleón propuso en una oportunidad un premio de 60.000 francos a aquel que diera un paso científico “comparable con los avances de Franklin y Volta”. El premio nunca fue entregado pero incentivó a Napoleón III a establecer un premio de 50.000 francos en 1852 a quien lograra el uso más significativo que pudiera darse a la batería voltaica. El premio fue otorgado una sola vez, en 1864, al constructor de la bobina de Ruhmkorff, el fabricante alemán de instrumentos de París, *Heinrich Ruhmkorff* (1803–1877).

Con la ayuda del inductorium y técnicas de vacío mejoradas se pudieron realizar estudios más avanzados sobre el fenómeno de las descargas eléctricas en vacío. El fabricante alemán de instrumentos *Heinrich Geissler* (1814–1879), realizó un importante aporte mediante la construcción de una nueva bomba de vacío que posibilitó que en un tubo de vidrio se alcanzara un nivel de vacío de manera sencilla: el así llamado *tubo de Geissler*.⁽⁵⁾

Entre los que experimentaron con la luz y el tubo de Geissler estuvieron los alemanes *Julius Plücker* (1801–1868) y *Johann Wilhelm Hittorf* (1824–1914) y el inglés *William Crookes* (1832–1919). Este último descubrió en 1857 que la columna de luz en el tubo de descarga luminiscente podía modificarse con la ayuda de un imán. Cuando leemos los años de nacimiento y fallecimiento de esos investigadores puede resultar interesante situar a Julio Verne y su isla misteriosa en el contexto histórico. Julio Verne vivió entre 1828 y 1905, escribió *L'Île mystérieuse* en 1875 y describió el acontecimiento como si hubiera tenido lugar en 1865.

Hittorf pudo mostrar que el objeto que se colocaba dentro del tubo de vidrio antes de extraer el aire podía hacer desaparecer el resplandor de luz particular en la pared de vidrio, como si los objetos arrojaran una sombra sobre la pared. Crookes repitió los experimentos de Hittorf con la ayuda de un tubo de descarga en el que el ánodo tenía la forma de una cruz, y podía estar alternativamente en forma vertical u horizontal.⁽⁶⁾

De ese modo él pudo observar la “sombra” de la cruz sobre la pared de vidrio y también notar el decaimiento de la fluorescencia de la pared de vidrio en la zona que no estaba sombreada.

Como consecuencia de los experimentos de Hittorf y Crookes se comenzó a hablar a fines de la década de 1870 de *rayos catódicos*, los cuales parecían salir del cátodo en los tubos de descarga eléctrica cuando la presión atmosférica era suficientemente baja. Crookes consideraba

(5) Geissler y Plücker también son conocidos por otro aporte: Fueron los primeros en descubrir que la densidad del agua es máxima a 4°C, lo cual permite, afortunadamente, que los fondos de los lagos no se congelen.

(6) Nota del Revisor: Juliusz Plücker en 1869 empleó un tubo de descarga con el ánodo en forma de “cruz de Malta”, sostenido por una bisagra que le permitía adoptar las posiciones vertical y horizontal con respecto al eje del tubo. En la posición vertical y el tubo de descarga en funcionamiento se podía observar una sombra en forma de cruz en la pared opuesta del tubo. Con el ánodo en posición horizontal no se producía la sombra y el área correspondiente mostraba una intensa fluorescencia. Se realizaron incluso otros experimentos en los que la “cruz de Malta” se interponía entre el cátodo y el ánodo.

que los rayos catódicos eran partículas cargadas eléctricamente.

En 1890 el físico inglés sir *Arthur Schuster* señaló que debería ser posible calcular la relación entre la carga de las partículas del rayo catódico (e) y la masa (m), si se conocía la velocidad de los mismos y podía medirse su cambio de dirección en un campo magnético dado. Sin embargo todavía no era posible establecer la velocidad de ellos.

En 1892 el físico holandés *Hendrik Lorentz* (1853—1928) presentó una teoría que afirmaba que toda materia contiene pequeñas partículas cargadas eléctricamente y las llamó con la denominación utilizada por Stoney: “electrones”. Con la ayuda de esta hipótesis, Lorentz pudo explicar algunos fenómenos ópticos que no cubría la teoría ondulatoria electromagnética original de Maxwell.

En una conferencia en 1902 Lorentz dijo (según Liljeström):

Un seguidor de Maxwell no tiene más que traducir la hipótesis acerca de los componentes giratorios al idioma de la teoría de la luz electromagnética. [...] ¿De qué clase de componentes se trata para que éstos se pongan en movimiento por fuerzas eléctricas oscilantes? La respuesta más sencilla a mano es la siguiente: deben tener cargas eléctricas.

¿Están los rayos catódicos compuestos por electrones? Hertz demostró en 1892 que era posible lograr que los rayos catódicos se escaparan del tubo de Geissler si se realizaba un orificio en la pared de vidrio y se la cubría con una delgada “ventana” de aluminio. Este descubrimiento fue desarrollado luego por su asistente, el húngaro *Philipp von Lenard* (1862—1947). El descubrimiento de Hertz parecía oponerse a la hipótesis de que los rayos catódicos estaban compuestos por partículas ya que resultaba difícil creer que las partículas podrían atravesar la materia sólida.

En Inglaterra se había creado el Laboratorio de *Cavendish* en Cambridge en 1870, como homenaje a la memoria del químico Henry Cavendish, el hombre que descubrió la ley de Coulomb antes que Coulomb, pero que no la había publicado. El primer director del laboratorio fue Maxwell, y después de su muerte en 1879 asumió el cargo lord Rayleigh. Lo sucedió J.J. Thomson en 1884, quien todavía no había cumplido 28 años.

En 1894 Thomson logró calcular la velocidad de las partículas del rayo catódico con la ayuda de un dispositivo con espejos rotativos y descubrió que era menor a 1/1000 de la velocidad de la luz. Los rayos catódicos no podían estar compuestos por ondas electromagnéticas; esas ondas debían propagarse a la velocidad de la luz. Recién en 1897 (como vimos en el capítulo 4) Thomson lograría comprobar la existencia del electrón y estimar su masa y carga eléctrica. Pero antes de que eso sucediera, realizó otro descubrimiento que haría historia.

Era evidente que en el otoño de 1895 se sabía mucho sobre los rayos catódicos, pero no todo. Se estaba muy lejos de eso. Se creía que estaban compuestos de partículas cargadas eléctricamente que eran increíblemente pequeñas que partían desde el cátodo y a muy alta velocidad (quizá solo a una fracción de la velocidad de la luz) eran atraídos hacia el ánodo por el campo eléctrico. La parte de los rayos que pasaban el ánodo sin ser atrapados por éste creaba una luz fluorescente verdosa cuando se encontraban con la pared de vidrio del tubo de vacío. Si la presión atmosférica no era demasiado baja, los rayos catódicos incidían también en las moléculas de aire restantes, lo cual generaba un aura.

Otra parte del aura parecía generarse por las partículas cargadas positivas que salían del ánodo. Se podía observar la acción de esas partículas tras pasar las ranuras, los “canales”, del cátodo. Se denominaron por eso rayos canales, después de ser descubiertos por el físico alemán *Eugen Goldstein* (1850—1930) en 1886. Ahora sabemos que están compuestos por

átomos ionizados y moléculas con carga positiva.

Los tubos de descarga más populares para los experimentadores eran, a mediados de la década de 1890, los tubos de Crooke, Hittorf y Lenard, todos destinados al estudio de los rayos catódicos y su acción fluorescente. Numerosos físicos realizaron experimentos con esos tubos.

La noche del 8 de noviembre de 1895 uno de ellos se preparaba en Würzburg para un experimento más con los rayos catódicos, un experimento cuyo resultado influiría fuertemente sobre el desarrollo de las ciencias naturales. Su nombre era Wilhelm *Conrad Röntgen* (1845–1923), y había nacido en el pueblo de Lennep, al nordeste de Colonia, el 27 de marzo de 1845.

La carrera de Röntgen es un relato con moraleja. Fue expulsado de la escuela secundaria en Utrecht. Röntgen vivió durante sus años de estudio en la casa de unos parientes en esa ciudad. La razón fue su firme negativa a delatar a uno de sus compañeros, autor de un dibujo que ridiculizaba a un profesor en el pizarrón. Cuando fue expulsado de la escuela secundaria se vio obligado a realizar estudios más prácticos en Holanda, pero debido a su interés en la locomotora, conoció a un ingeniero suizo que lo ayudó a inscribirse en la Escuela Tecnológica de Estudios Superiores de Zurich.

Gracias a esa ayuda, Röntgen obtuvo el diploma de ingeniero en ingeniería mecánica en 1868 y luego defendió su tesis al año siguiente. Algo sorprendido por este éxito pero igualmente perdido respecto de qué haría en el futuro, Röntgen buscó al joven diplomado en física experimental y profesor de acústica *August Kundt* (1839–1894). Kundt le preguntó:

-¿Qué quiere hacer de su vida?

- No lo sé, profesor, respondió Röntgen.

-¿Quiere intentar con la física?, preguntó Kundt, luego de lo cual el muy honesto Röntgen respondió:

-Hasta ahora nunca me dediqué a esa cuestión.

Por motivos desconocidos, Kundt respondió inesperadamente:

- ¡Siempre se puede recuperar lo que se perdió!

Y le dio empleo a Röntgen como asistente suyo. Pronto Röntgen fue de gran ayuda y cuando Kundt fue convocado en 1870 como profesor en Würzburg, el joven Röntgen lo acompañó. Cuando tiempo después Kundt propuso a Röntgen para un cargo como docente, la facultad se negó a aceptarlo argumentando que no había aprobado el examen final de la escuela secundaria!

Kundt y Röntgen se trasladaron algunos años después a Strassburg, donde Röntgen fue nombrado “Privatdozent” (es decir, profesor dependiente de los honorarios que pudiera obtener directamente de sus estudiantes) y con el tiempo también se convirtió en profesor.

Durante la década de 1880 Röntgen realizó un número de importantes aportaciones a la física y descubrió, entre otras cosas, *la corriente de Röntgen*, es decir, la capacidad del material eléctrico no conductor de inducir un campo magnético cuando se pone en movimiento en un campo eléctrico. En octubre de 1888 fue convocado a ocupar una cátedra como profesor en Würzburg, la misma facultad que le había negado la posibilidad de ser docente.

En la noche del 8 de noviembre de 1895 encontramos a Röntgen preparado en su laboratorio de la planta baja de una casa de Pleicher-Ring, dispuesto a continuar sus estudios sobre los efectos fluorescentes de los rayos catódicos. Lo que verdaderamente sucedió esa noche resulta difícil de reconstruir, ya que Röntgen era modesto y de pocas palabras, rara vez permitía ser entrevistado y dejó establecido que todos sus papeles se quemaran después de su muerte. A comienzos de 1896 permitió que lo entrevistara un periodista de McClures Magazine. La entrevista, reproducida detalladamente en el libro de Friedrich Dessauer acerca de Röntgen, es el relato más confiable que tenemos sobre cómo fueron descubiertos los

rayos X o rayos Röntgen:

— Profesor, comenzó H.J.W. Dam, periodista de Mc Clures. — ¿Quisiera ser tan amable de contarnos la historia sobre su descubrimiento?

— No hay en realidad ninguna historia, respondió Röntgen. — Durante mucho tiempo me interesé en los rayos catódicos, así como Hertz y especialmente Lenard estudiaron el vacío. Yo había seguido sus estudios y los de otros físicos con gran interés y me decidí, en cuanto tuve tiempo, a realizar mis propios experimentos. Encontré el tiempo necesario para dedicarme a ellos a fines de octubre de 1895. No había pasado mucho tiempo desde que había comenzado cuando observé algo nuevo.

¿Qué día era?

— El 8 de noviembre.

— ¿Y cuál fue esa observación?

— Yo trabajaba con un tubo de descarga Hittorf—Crookes que estaba totalmente envuelto en papel negro⁽⁷⁾. El trozo de papel cubierto de platino-cianuro de bario estaba junto a la mesa. Envió corriente a través del tubo y noté una línea negra extraña oblicua sobre el papel.

¿Qué era?

— El efecto era tal que con las ideas de entonces solo podían explicarse como provenientes del rayo de luz. Pero estaba totalmente descartado que pudiera provenir de la luz del tubo, ya que el papel que lo cubría no permitía dejar pasar luz alguna, ni siquiera de una lámpara de arco eléctrica.

— ¿Qué pensó entonces?

— No pensé: investigué.

Esas palabras de Röntgen han pasado a la historia: *Ich dachte nicht, sondern ich untersuchte*. “Tentando, non cogitando” fue una frase célebre después de que se publicara el artículo de Dam.⁽⁸⁾

La fuente de alta tensión fue una bobina de Ruhmkorff que hoy se exhibe en el Deutsches Museum de Munich. La bobina generaba entre 10 y 25 descargas por segundo y se calcula que la tensión máxima era de 40.000 a 60.000 voltios (40—60 kV). El tubo de descarga de Röntgen fue, con toda seguridad, un simple tubo Hittorf, en el que el ánodo se encontraba junto al tubo para dejar el camino libre a los rayos catódicos hacia el vidrio en el extremo del tubo.

Röntgen experimentó de manera intensiva pero en silencio durante siete semanas después de su descubrimiento. El 28 de diciembre estaba listo para las investigaciones y entregó su primer comunicado, *Eine neue Art von Strahlen* (“Un nuevo tipo de rayos”), al profesor *Otto Lehmann*, presidente de la sociedad de física y medicina de Würzburg. Cuando volvió con su mujer, la saludó con estas palabras:

—Ya está, ¡ahora pueden dejar suelto al diablo!

La esposa de Röntgen conocía el secreto, pero a pesar de ello no pudo evitar el susto al observar los nuevos y extraños rayos. El mismo Röntgen se preocupaba al pensar que quizá se había equivocado. Tan extraño le resultaba el descubrimiento realizado. El primer párrafo del comunicado “preliminar” de Röntgen dice:

(7) La intensidad de Röntgen se ha debatido. Dessauer ha adivinado que Röntgen quería separar toda luz fluorescente proveniente de las paredes de vidrio del tubo de Hittorf, para poder ver en el laboratorio oscuro si los rayos catódicos contenían algún componente que tuviera tanta capacidad de penetración que pudiera penetrar la pared de vidrio y el papel oscuro. El pedazo de papel con platino-cianuro de bario era utilizado para demostrar el rayo penetrante con ayuda de la fluorescencia.

(8) Según otras fuentes, la misma respuesta tuvo una entrevista de sir James Mackenzie-Davidson cuando en 1896 conversó con Röntgen.

Si se permite la descarga de un Ruhmkorff lo suficientemente grande que atravesase un tubo vacío de Hittorf o un tubo de Lenard o de Crookes que ha sido suficientemente evacuado, estando el tubo cubierto por una fina cartulina negra que se ajusta bien al mismo y si todo el aparato es colocado en una habitación completamente oscura, se observa que una pantalla de papel revestida con platino-cianuro de bario, colocada cerca de la bobina, brilla a cada descarga independientemente de que la superficie este recubierta por el material fluorescente o si el otro lado de la pantalla se gira hacia el aparato de descarga. La fluorescencia es visible aún a 2 metros de distancia del aparato.

Es fácil convencerse de que lo que genera la fluorescencia proviene del aparato de descarga y no de cualquier otro punto del circuito.

Röntgen investigó la capacidad de penetración de la radiación con todo lo que tuvo a mano: papel, libros, naipes, chapas de metal, etc. Descubrió que la radiación atravesaba fácilmente y sin dificultad madera, papel e incluso capas delgadas de metal, pero la capacidad de penetración disminuía cuanto mayor era la densidad de la materia irradiada. Descubrió que 1,5 mm de plomo era casi impenetrable y por ello utilizó el plomo para tapar la radiación. Él demostró que la radiación podía ennegrecer la película fotográfica, algo imposible de descubrir con los sentidos. Realizó consigo mismo lo que hoy son considerados como experimentos peligrosos y escribió:

La retina del ojo es insensible a nuestros rayos. Un ojo que se encuentra muy cerca del aparato de descarga no nota nada, a pesar de que nuestras experiencias nos dicen que las sustancias existentes en el ojo deben ser suficientemente penetradas por los rayos.

Respecto de las propiedades físicas de los rayos, Röntgen descubrió que no podía refractarlos en prismas o en la transición del aire a alguna otra materia y que no podía generar ninguna reflexión sobre ninguna superficie. Tampoco podía polarizar los rayos y descubrió que su capacidad de penetración dependía principalmente de la densidad del material. Nada de esto indicaba un parentesco con la luz o la radiación ultravioleta.

Por otro lado la formación de sombra demostraba que los rayos se propagaban de manera rectilínea. La luz fluorescente y el ennegrecimiento de la película demostraban que transportaban energía. Röntgen se preguntaba si se trataba posiblemente de ondas electromagnéticas longitudinales, algo acerca de lo cual no había escuchado nada hasta entonces (ni tampoco después).

Röntgen continuó con sus minuciosos estudios de los extraños rayos. En un segundo comunicado en marzo de 1896 contó cómo había investigado la capacidad de los rayos de ionizar el aire (lo cual era un descubrimiento significativo). También había demostrado que los rayos catódicos no necesitan pasar por un vidrio para generar los nuevos rayos. Esos rayos parecían

generarse dondequiera que los rayos catódicos pasaran la materia.⁽⁹⁾

El tercer comunicado de Röntgen (en mayo de 1897) tenía un título nuevo (el anterior se había llamado simplemente “continuación”): “Más observaciones de las propiedades de los rayos X”. La timidez de Röntgen le impedía hablar de los “rayos röntgen”, a pesar de que los nuevos rayos ya eran llamados así en muchos países. Desde un principio había dicho: “A los efectos de la simplicidad voy a utilizar la denominación rayos X a este fenómeno porque no conozco su naturaleza en profundidad.” En la actualidad, las publicaciones en inglés siguen utilizando la expresión habitual “x rays”.⁽¹⁰⁾

En alemán, al igual que en sueco, se habla de la “radiación röntgen”. En la reunión de la sociedad de física y medicina de Würzburg del 23 de enero de 1896 se propuso denominar “Rayos röntgenianos” a los rayos X. La propuesta fue recibida con júbilo. En el acta de la reunión se dejó asentado que los nuevos rayos serían probablemente de gran utilidad en el campo de la medicina. Al respecto, Röntgen había comentado que la radiación de los tubos disponibles no tenía capacidad de penetración suficiente si se quería radiografiar otras partes del cuerpo que no fueran los brazos y las piernas. Por eso debían fabricarse tubos mejores.

En su tercer artículo Röntgen dio cuenta de sus observaciones acerca de la difusión de la radiación X. También pudo demostrar que la capacidad de penetración de la radiación aumentaba más después de haber pasado varios discos de metal, los “filtros”. Demostró que la causa era que los primeros discos filtro absorbían completamente los componentes más “blandos” de la radiación, es decir, los que menos penetraban. Restaban los más “duros”, en otras palabras, los que tenían mayor capacidad de penetración. De esta manera Röntgen también había demostrado que la radiación de frenado era heterogénea y estaba compuesta por componentes de diferente capacidad de penetración.

Como base de sus tres comunicados Röntgen había investigado en la práctica todo lo importante que había para decir acerca de los rayos röntgenianos, una hazaña experimental admirable. Al estudiar su radiación durante un tiempo tan limitado y por razones de medición técnica, estaba preocupado por separar toda la radiación innecesaria. Logró también evitar los efectos dañinos de la radiación.

Röntgen obtuvo el primer premio Nobel de física en 1901. Entonces ya era – y desde hacía un año – profesor en Munich y dedicó el resto de su vida y hasta su muerte en 1923 a enseñar más que a investigar. Se negó a patentar sus descubrimientos y vivió una vida sin pretensiones y sin obtener ningún beneficio económico por un descubrimiento que hizo época.

(9) Según Maxwell no salen ondas electromagnéticas solo porque las cargas eléctricas se mueven (por ejemplo, desde un conductor de corriente con corriente continua), sino solo cuando el estado de movimiento de las cargas *se modifica*. Al momento del descubrimiento de Röntgen, J.J. Thomson todavía no había demostrado definitivamente la existencia del electrón, pero se daba por sentado que los rayos catódicos estaban compuestos por cargas eléctricas en movimiento. Los rayos de Röntgen se generaban de acuerdo con esto cuando los electrones de los rayos catódicos son frenados en la materia. El cambio de movimiento es más rápido que la aceleración de los electrones en el tubo de vacío. La radiación Röntgen que surge de esa manera es llamada por ello *radiación de frenado* (del alemán “Bremsstrahlung”). Era la radiación de frenado lo que Röntgen estudiaba.

(10) Aquí pueden venir bien algunos consejos. Actualmente se escribe “x rays” con letras minúsculas (excepto en títulos o al comenzar una oración). Se utiliza un guión después de la equis solo cuando la palabra se utiliza como adjetivo. O sea que se dice “Röntgen discovered x rays” pero “The hospital uses x-ray equipment”. La equis en “x ray” se pronuncia en inglés de la misma manera que la “x” en sueco (nota del trad.: “ex”).

7 | Los pioneros röntgenianos

La rapidez con que se difundió el descubrimiento de Röntgen en el mundo fue única. Debemos recordar que Röntgen entregó su informe preliminar a la Sociedad de Física y Medicina de Würzburg el 28 de diciembre de 1895 y que presentó los descubrimientos en una conferencia ante la misma sociedad el 23 de enero de 1896. El mismo día *Arthur Stanton* publicó la primera traducción del comunicado de Röntgen en inglés en la revista *Nature*.

Antes de eso, el mismo Röntgen había enviado por correo (y como saludo de fin de año el 2 de enero de 1896) copias de su comunicado a un número de colegas, entre otros, Friedrich Kohlrausch en Göttingen, Henri Poincaré en París y sir Arthur Schuster en Manchester. Otro destinatario fue su compañero de estudios en Suiza, el profesor de física *Franz Serafin Exner* de Viena, que mostró la noticia a sus amigos. Entre ellos estaba el físico *Ernst Lecher* (1856—1926), cuyo padre era el editor de *Die Freie Presse*.

De esa manera el descubrimiento de Röntgen se publicó por primera vez en *Die Freie Presse* el domingo 5 de enero de 1896. El artículo llegó a otras capitales europeas el lunes 6. Desde el periódico londinense *Standard* fue enviado un telegrama que llegaría durante ese lunes a los Estados Unidos. El miércoles 8 de enero varios periódicos estadounidenses publicaron la noticia.

En un primer momento las revistas científicas solo conocían las noticias publicadas en los diarios, lo cual colocaba a los pobres redactores en una situación embarazosa. Si la noticia era cierta, el descubrimiento era tan sensacional que si no se publicaba de inmediato traería graves consecuencias. Si la noticia no tenía fundamento (como suele ser la mayoría de este tipo de noticias) y se publicaba, harían el ridículo. Por eso se publicó la noticia con las reservas del caso. Algunas notas fueron más atrevidas y burlonas. El redactor del periódico londinense *Electricians* dudó de que alguien tuviera deseos de sentarse para ser fotografiado y que el resultado no mostrara otra cosa más que un esqueleto y anillos. (Una descripción detallada de esta interesante etapa ha sido publicada en la obra de *E.R.N. Grigg* acerca del desarrollo de la radiología, *The trail of the invisible light* [“El rastro de la luz invisible”]. Los interesados pueden leer más en ese trabajo).

La noticia se difundió rápidamente en Suecia. El catedrático de matemática y física del Instituto Real de Gotemburgo, *C.A. Mebius*, fue uno de los que repitió el experimento de Röntgen llevado por la curiosidad. Mebius escribió el siguiente comentario en el periódico *Nya Dagligt Allehanda* el 13 de noviembre, con motivo de su octogésimo cumpleaños:

A comienzos de 1896 el catedrático P.G. Laurin⁽¹⁾, actualmente director general, y yo decidimos realizar experimentos para generar rayos X. Los experimentos tuvieron lugar en el Instituto Real de Gotemburgo. Como fuente de electricidad teníamos solamente una máquina de electricidad por influencia Holtz. No pudimos comprar un tubo röntgen. Durante mi época en Uppsala había aprendido a soplar vidrio y por eso construí una bomba de mercurio sencilla y un pequeño tubo röntgen. Después de algunos intentos logré también generar rayos röntgen y fotografiamos nuestros dedos. Aún hoy conservo esas primeras fotografías. Aproximadamente una semana después de la fotografía apareció en cada uno de nosotros una quemadura, lo cual mostraba los primeros efectos fisiológicos de los rayos röntgenianos en Suecia.

Grigg ha analizado en profundidad quién fue el primero que intencionalmente tomó la primera fotografía röntgeniana después de Röntgen. Es posible que haya sido un escocés, *Alan*

(1) Paul Johan Gerhard Laurin (1863—1935) era catedrático en Gotemburgo y autor de libros de texto antes de ser nombrado director general y jefe de la Inspección de Seguros en 1908.

Archibald Campbell Swinton. Se trataba de un ingeniero que llevaba un pormenorizado libro acerca de sus experimentos. Después de un intento fracasado el 7 de enero de 1896, logró fotografiar al día siguiente una navaja en su estuche. El 13 de enero fotografió su mano. En su autobiografía (1930) Swinton recuerda cuando le mostró la fotografía röntgen al príncipe de Gales, que gritó: “How disgusting!” (“¡Qué repugnante!”)

En Estados Unidos el inmigrante serbio *Michael Idvorsky Pupin* (1858—1935) afirmó que había logrado la primera fotografía röntgen dos semanas después de que se hiciera público el descubrimiento en Alemania. Según Pupin, el 2 de enero de 1896. Esta fecha, sin embargo, no es correcta. Grigg analiza la actividad de Pupin día por día y demuestra que éste debe haber interpretado mal la fecha. Probablemente tomó la primera el 2 de febrero, dos semanas después de la presentación oral de Röntgen en Würzburg el 23 de enero de 1896. Pupin no era un embustero: Era profesor de electrotécnica en la Columbia University de New York en 1901 y había adquirido fama por sus investigaciones acerca de la telefonía a larga distancia.

La primera fotografía röntgeniana en Suecia de una parte del cuerpo humano fue tomada en Uppsala el 16 de febrero de 1896 por el profesor adjunto de fisiología y luego profesor *Hjalmar Öhrwall* (1851—1929). La fotografía mostraba la mano con dos anillos de su jefe, el profesor *Frithiof Holmgren* (1831—1897) y se conserva en el hospital Akademiska Sjukhuset. Las fotografías röntgen de otros objetos habían sido obtenidas una semana antes.

El desarrollo fue muy rápido durante 1896. A fines de febrero la prensa especializada informó que se habían tomado fotografías röntgen en todo el mundo. Se habían podido mostrar agujas en manos y pies de pacientes y hasta se habían radiografiado momias.

Si bien Pupin no fue el primero con su fotografía röntgen, sí lo fue al amplificar la imagen con una pantalla fluorescente. Estaba a su alcance, puesto que Röntgen ya había utilizado una pantalla fluorescente para demostrar la radiación.

Y fue entonces cuando aparecieron los inventores profesionales en escena. *Thomas Alva Edison* (1847—1931) investigó miles de sustancias para obtener la mejor pantalla fluorescente. El 25 de marzo de 1896 publicó en el *Electrical Engineer* un dispositivo en el que una pantalla con volframato de calcio estaba ubicada en el frente de un “cosmorama”, para que el observador pudiera mantener la vista adaptada a la oscuridad, incluso en un entorno luminoso y así poder ver más fácilmente la imagen creada por la radiación sobre la pantalla fluorescente. El invento fue llamado *vitascopio* pero pronto fue rebautizado como *fluoroscopio*, un nombre que todavía está vivo en la palabra inglesa utilizada en los estudios radiográficos: “fluoroscopia”.

Un par de meses después del descubrimiento de Röntgen estaba claro cuáles eran los dos métodos que podrían utilizarse en la reproducción röntgeniana medicinal: La fotografía röntgen o radiografía (“radiography”) y la fluoroscopia (“fluoroscopia”). Este último método era, sin embargo, peligroso tanto para el examinador como para el paciente. Debido a que el médico debía observar la pantalla fluorescente durante la radiación misma, resultaba difícil evitar que el médico también fuera irradiado. El fluoroscopio de Edison causó mucho daño radioactivo, incluso entre los observadores que estaban fascinados al poder ver sus propias manos. Edison comprendió esto cuando su asistente y soplador de vidrio *Clarence Madison Dally* comenzó a perder el pelo y presentar lesiones cutáneas en las manos. Edison interrumpió todos sus experimentos con el fluoroscopio. Otros no fueron tan precavidos.

En el periódico sueco *Sala Allehanda* del 7 de agosto de 1896 se publicó la siguiente información:

Una víctima de los rayos röntgen. Un aporte interesante a los extraños efectos observados en los rayos röntgen en el cuerpo humano se ha presentado en un caso que atrajo recientemente la atención en Berlín.

El 1 de julio un médico de Berlín trató a un joven de 17 años durante cuatro semanas, casi diariamente una o incluso dos veces por día, en un experimento con los rayos röntgen. Cada sesión duraba habitualmente entre 5 y 10 minutos. La observación del pecho se realizaba durante un período un poco más prolongado mientras el observador mostraba particular interés en ver los latidos del corazón y los movimientos del diafragma. La distancia del tubo, debe añadirse, era siempre insignificante y a menudo tocaba al cuerpo mismo. Sin embargo del tubo de Hittorf emanaba muy poco calor y el joven estaba siempre vestido durante los experimentos. Las consecuencias de esos experimentos fueron las siguientes: La piel del lado del rostro que miraba al tubo se había enrojecido de manera intensiva con una tonalidad marrón alternante. En algunos lugares había descamación. Al realizar un lavado con vinagre la consecuencia fue, como expresó el joven, que "la piel se caía a pedazos". El enrojecimiento se mantuvo, aunque algunas partes se aclararon. En la piel con pelos de la cabeza los rayos röntgen también eran perceptibles. En las sienas aparecieron zonas peladas completamente, grandes como una moneda de dos coronas. El cuero cabelludo era en ese lugar sorprendentemente pálido. Los cabellos restantes eran cortos, delgados y podían extraerse con facilidad. También el pecho presentaba signos claros después del experimento. En la espalda hay un lugar del tamaño de un plato en el cual la epidermis se ha desprendido completamente y el tejido subyacente con muchos lugares ensangrentados está expuesto. Buena parte de la piel circundante tiene un color ocre. Es notable que ni el joven ni los asistentes presentes durante el experimento no hayan observado signos de enfermedad. De lo contrario el experimento se habría interrumpido antes.

En la actualidad nos hacemos a la idea de que el procedimiento desde la concepción o descubrimiento hasta la realización práctica (para no hablar de la aplicación comercial) lleva tiempo. ¡Qué diferente fue todo después del descubrimiento de Röntgen! Recordemos que el mundo no sabía nada al respecto antes de esa semana de enero de 1896.

Apenas dos años después, el día previo a la noche de fin de año de 1897, el teniente del 4to. Regimiento de húsares de la reina británica, *Winston Spencer Churchill* (1874—1965), escribía en el cuartel de caballería en Bangalore en la India suroccidental el prólogo de su primer libro, *The Story of the Malakand Field Force* (en traducción al sueco de 1944: *Striden om Malakand*). El libro lo había escrito durante la expedición punitiva contra los rebeldes en el paso de Malakand en el extremo noroccidental de la entonces India, cerca de la frontera con Afganistán, al pie del Himalaya, en lo que hoy es Paquistán. Churchill, de 23 años de edad, había participado como corresponsal de la publicación *The Pioneer*, pero participó en los enfrentamientos cuando la situación fue crítica.

A comienzos de agosto de 1897, veinte meses después del descubrimiento de Röntgen, una fuerza expedicionaria había sido equipada para avanzar sobre el valle de Swat. Churchill describe en su libro los preparativos de esta operación:

Antes de que esta fuerza se pusiera en movimiento, un hecho lamentable tuvo lugar. El 12 de agosto falleció el teniente coronel J. Lamb, herido la noche del 27 de julio. Una amputación le habría quizás salvado la vida pero se pospuso a la espera de un aparato röntgen que haría posible extraer la bala. El aparato llegó algo retrasado desde la India. Cuando llegó a Malakand se lo utilizó de inmediato. Sin embargo el aparato había sido dañado durante el transporte, y no se obtuvieron

resultados. Durante ese tiempo apareció la gangrena y el bravo guerrero falleció el domingo después de una amputación, pero estaba demasiado débil para sobrevivir. Había prestado servicios en Afganistán y el valle de Zhob y había sido mencionado dos veces en los informes.

¿No hay acaso una fuerte brisa de un coletazo de la historia en esas líneas, que no solo describe un hecho acontecido en el verano de 1897 sino que también está escrito el mismo año? ¿Y no es notable que los aparatos röntgen para diagnóstico médico no solo ya existieran sino que también estaban disponibles al pie del Himalaya apenas diecinueve o veinte meses después del descubrimiento de Röntgen? ¡Y que además no fueran mencionados por un corresponsal de guerra de 23 años como una maravilla y un nuevo invento sino como un recurso técnico completamente natural y que con toda razón se enojara porque éste no funcionaba!

El profesor *Folke Henschen* (1881—1977) escribió acerca de este período pionero en Suecia en su libro de memorias *Min långa väg till Salamanca (Mi largo camino a Salamanca)* de 1957. Su padre, el igualmente famoso *Salomon Henschen* (1847—1930), era profesor de medicina interna de Uppsala. Era un hombre de gran iniciativa con muchos intereses y el descubrimiento de Röntgen repercutió en su laboratorio. Folke Henschen escribió:

Desde épocas tempranas pude acompañar a mi padre hasta el hospital. Era divertido, pero se trataba de poder seguirlo, ya que caminaba muy rápido y yo tenía que tomarlo del dedo meñique, corriendo y sin aliento. Nos apresurábamos a subir la gran escalera del hospital, que luego fue eliminada, e ingresábamos en su laboratorio. Allí todo olía extraño, una mezcla de cerebros Müller endurecidos, bálsamo de Canadá y éter, que se utilizaba en el criomicrotomo. En el laboratorio había vida y movimiento. En la gran sala se dibujaban cerebros en una ventana y en la otra se los operaba con microscopio. Carl Hammarberg, Albin Hildebrand y otros se ocupaban de los micrótomos. La señorita Mary Green y Anna Henschen, de la vieja rama de nuestra familia, eran las asistentes. En el pequeño laboratorio había una silla con perímetro y muchos tarros con cerebro.⁽²⁾ En el laboratorio inferior se realizaban análisis de orina, y había un estante completo con reactivos químicos. Recuerdo que el aspirante Israel Hedenius me mostraba reacciones simples con sulfuro de hidrógeno y sales férricas o nitrato de plata y sal de cocina. Recuerdo cuánto me sorprendía.

El pequeño laboratorio del primer piso se despejó parcialmente ya que allí se colocaría el aparato Röntgen. Era el otoño de 1896. El Profesor Knut Ångström⁽³⁾ ayudó a mi padre a montar el aparato y yo ayudé con las conexiones. Pronto pude ocuparme de cuidar el pequeño y sencillo aparato con pantalla fluorescente y jugar un poco con él. Durante la primavera y verano siguientes se exhibió un aparato más grande en la exposición de Estocolmo, a cargo del bedel Andersson en lo de Emil Holmgren.⁽⁴⁾ No se pensó en algunos dispositivos de seguridad y la consecuencia fue que las manos de Andersson se vieron muy afectadas: presentaban una piel seca muy descamada, frágil en las partes superiores y uñas secas y frágiles. Sin embargo jamás se desarrolló cáncer como en la casa de uno de los pioneros de la radiología en Estocolmo, el Dr. Tage Sjögren, cuyos dedos debí examinar para observar partes afectadas o sospechosas de cáncer en diversas oportunidades.

(2) Los grandes aportes científicos de Salomon Henschen estuvieron relacionados con la exploración de las funciones del cerebro. Logró descubrir que el sentido de la vista está localizado en el lóbulo occipital.

(3) (1857—1910) El profesor de física e hijo de Anders Ångström (1814—1874), que dio nombre a la unidad ångström (Å) por establecer las longitudes de las ondas de luz (1 Å = 10-10 m).

(4) 1866—1922) Sobrino de Frithiof Holmgren y luego profesor de histología en el Karolinska Institutet y uno de los maestros de Henschen.

Con el sencillo y pequeño aparato Röntgen, el Dr. Thor Stenbeck tomó radiografías de un paciente con una bala en la parte posterior del cerebro en enero de 1897. La bala fue extraída por Lennander,⁽⁵⁾ y la cicatrización fue rápida. Éste debe haber sido el primer caso en el que una bala fue extraída con la orientación de las fotografías röntgen. Mi padre, que había examinado al paciente, dio una conferencia sobre el caso cuando estubo en Moscú en 1897.

Folke Henschen nunca recibió una reprimenda por jugar con el aparato Röntgen del papá Salomón, a pesar de que no era un juguete adecuado. Aún en la década de 1970 se lo veía como un profesor emérito vital y entusiasta en los laboratorios de investigación del hospital Karolinska.

Como se afirma en el libro de Henschen, *Thor Stenbeck* (1864—1914) desarrolló una gran actividad tanto con el diagnóstico radiográfico como con la radioterapia. Otro pionero mencionado por Henschen fue *Tage Sjögren* (1859—1939), hermano del famoso geólogo *Hjalmar Sjögren* (1856—1922). Sjögren tuvo durante el período 1899—1921 una clínica radiológica privada en Estocolmo, de gran significado para el desarrollo de la radiología sueca. En Gotemburgo trabajaba el tercero de los pioneros suecos, *Ivar Bagge*, quien desde 1899 y durante mucho tiempo sería el único radiólogo de Suecia occidental.

Pero el verdadero pionero fue Thor Stenbeck. Él nació en Skåne (Escania) en 1864, estudió primero en Lund y luego llegó a Estocolmo, donde en el otoño de 1886 se inscribió en el Instituto Karolinska. Obtuvo su diploma de médico en 1889 y de licenciado en medicina en 1895.

Stenbeck fue un hombre con mucha inventiva. Ya en 1891 publicó en la revista de la Sociedad Médica Sueca *Hygiea* una descripción de un centrifugador que había inventado y utilizado para separar los componentes sólidos de las muestras de orina para examen microscópico. Éste fue un trabajo pionero que generó la atención internacional. Era la primera vez que el centrifugado se utilizaba directamente al servicio de la medicina.

Ya en febrero de 1896 (!) Stenbeck adquirió un equipo röntgen para su departamento en la ciudad vieja de Estocolmo, y el 18 de febrero dio una conferencia en la Sociedad Médica Sueca con el título “Acerca del descubrimiento Röntgeniano de los rayos X y su desarrollo histórico”. Mostró imágenes radiográficas que él mismo había tomado el 9 de febrero de un estuche de madera conteniendo instrumental quirúrgico. El 28 de febrero ofreció la misma información en la asociación médica de Uppsala en una conferencia de Hjalmar Öhrvall, que había radiografiado una mano con un anillo el 16 de febrero.

En mayo de 1896 Stenbeck obtuvo una asignación del Instituto Karolinska para la compra de equipos y en junio del mismo año obtuvo un subsidio estatal para viajar en viaje de estudios al extranjero. Durante los años siguientes obtuvo cada vez más apoyo de diferentes lugares. Pudo estudiar en 1898 la radioterapia del lupus (tuberculosis cutánea) en el Instituto Finsen de Copenhague y luego también en Hamburgo. El Instituto Finsen había sido fundado en 1896 por el médico danés y luego ganador del Premio Nobel de 1903, *Niels R. Finsen* (1860—1904) obtenido por el tratamiento de la tuberculosis cutánea con radiación ultravioleta de lámparas de arco (“lámparas de luz solar”).

Como surge de los recuerdos de Folke Henschen, Stenbeck logró localizar una bala en un paciente con la ayuda de las radiografías, lo cual permitió la que fue probablemente la primera operación exitosa para extraer una bala del cerebro. Según una información, la primera imagen se tomó el 10 de septiembre de 1896, algo que no corresponde con los recuerdos de Henschen, que afirmaban que esto había sucedido algunos meses más tarde.

(5) Karl Gustaf Lennander (1857—1908), profesor de cirugía de la universidad de Uppsala, con fama de cirujano muy habilidoso.

La operación la realizó el profesor K.G. Lennander el 2 de febrero de 1897 en el Hospital Académico de Uppsala y Salomon Henschen relató el caso en el Congreso Internacional de Medicina en Moscú, entre el 7 y el 14 de agosto de 1897.

Stenbeck también fue pionero de la radiografía dental, algo sobre lo que volveré en el capítulo 10.

En el otoño de 1897 Stenbeck mostró en la Sociedad Médica Sueca lesiones cutáneas y en lasañas de un hombre que había asistido a una demostración de los aparatos Röntgen para el público. Lo más probable es que se tratara del bedel Andersson, mencionado por Henschen. La lesión fue en ese caso resultado del gran interés que despertó el aparato röntgen en la exposición de Estocolmo entre el 15 de mayo de y el 1 de octubre de 1897.

En 1898 Stenbeck presentó un informe con los resultados del tratamiento de 52 pacientes que habían sido irradiados con radiación röntgen contra el reumatismo articular crónico. En ciertos casos pareció que la irradiación había sido positiva pero Stenbeck no se atrevió a extraer conclusiones definitivas ya que consideraba que la cantidad de pacientes era demasiado pequeña.

En 1899 Stenbeck y Sjögren abrieron su propio instituto radiográfico privado en Estocolmo para realizar exámenes radiográficos e irradiación.

Stenbeck se trasladó a la planta baja del edificio de la calle Mäster Samuelsgatan 63, construido en 1712 y renovado en 1899. Stenbeck se hizo cargo de un local con entrada por la calle Vasagatan y una sala de espera dentro de la gran vidriera. El aparato Röntgen estaba en el interior del local.

Esta actividad y el primer tratamiento exitoso del mundo contra el cáncer comenzaron el 4 de julio de 1899. El aparato Röntgen era atendido por un joven alto, de 23 años, que recibía 25 centavos de corona sueca por cada tratamiento y fue su fuente de ingresos hasta el otoño de 1900. El joven había nacido el 2 de marzo de 1876 y falleció el 13 de noviembre de 1950. Es recordado y honrado como el “padre de la radiología sueca”. Su nombre era Gösta Forssell.

En 1902 Stenbeck se mudó del edificio de la calle Mäster Samuelsgatan a un departamento en la calle Strandvägen 17. Con la ayuda del ferry hasta Slussen se trasladaba todos los días entre el consultorio de Strandvägen y los locales de la ciudad vieja, primero en la calle Triewaldsgränd 1 (actualmente número 3), y después, en 1903, en la calle Västerlånggatan 66. Más tarde se trasladaría a la calle Västerlånggatan 62 en 1907. Su vida terminó en tragedia. Su joven esposa falleció en 1914 y él, en la desesperación, se suicidó con tan solo 50 años de edad.

Sjögren, quien también se había preparado exhaustivamente para su labor radiológica, era 5 años mayor que Stenbeck. Había nacido en 1859. Realizó en el otoño de 1898 uno de los primeros cursos de física radiológica en Berlín. Pudo utilizar esos conocimientos cuando abrió su consultorio radiológico en Estocolmo en 1899 y se encontró con numerosas dificultades técnicas. Incluso las burocráticas, como cuando tuvo que pedir autorización a la compañía de electricidad para conectar su aparato röntgen a la red eléctrica.

Sjögren parece haber tenido mejores contactos con los hospitales de Estocolmo que el más impulsivo Stenbeck, que tenía mayor interés en su consultorio privado. Sjögren, que trabajaba más sistemáticamente, dijo acerca de Stenbeck: “Lamentablemente este hombre inteligente no ha dejado mayores aportes al desarrollo de la nueva ciencia.” Quizá haya sido un juicio de valor muy justo. Sjögren fue consultor del hospital Sabbatsberg en 1901 y trabajaba junto con sus colegas en el desarrollo de la radiología, lo cual conllevó muchos métodos novedosos y buenos resultados en los tratamientos de numerosos tipos de tumores. *Seved Ribbing*, que luego sería jefe de servicio de radiología en Linköping, recuerda una cena en 1935 donde le causó gran impresión esos señores mayores vestidos de frac. Le llamó la atención Gösta Forssell, “una ca-

beza más alto que toda la gente, con su melena de león de cabellos plateados”. Otro que atrajo su atención fue Tage Sjögren. Él recordaba que “que debió tener cuidado al estrechar los restos de la mano izquierda de Tage Sjögren. La derecha había sido amputada debido a las lesiones que le causaron los rayos X”. Sjögren falleció en 1939.

Thor Stenbeck publicó en 1900 un libro llamado *Los rayos röntgen al servicio de la medicina*. De esa obra se pueden extraer los siguientes datos para el establecimiento de laboratorios de rayos X en Suecia a fines del siglo XIX:

Cuadro 7:1 Primeros laboratorios radiológicos en Suecia (según Stenbeck)

desde 1896	
febrero	Universidad de Uppsala Instituto de Thor Stenbeck
primavera	Universidad de Lund (fisiología)
diciembre	Instituto de cirugía dental de Schultzberg
principios de 1897	Hospital de Lidköping
primavera	Instituto del Dr. Elfström. de Sundsvall Hospital de Norrköping
primavera de 1898	Hospital de Växjö Hospital Académico, Uppsala Sanatorio Kneipp, Borg
junio de 1899	Instituto de Tage Sjögren Instituto Röntgen, Estocolmo
verano	Instituto de Ivar Bagge, Gotemburgo“

Según el *Dr. Moritz Simon*, quien investigó durante la década de 1920 (al poco tiempo de ser nombrado jefe de servicio del hospital de Sabbatsberg) la historia temprana de la radiología sueca, debe añadirse a la lista que el hospital de Linköping obtuvo su primer aparato röntgen en 1898 y el hospital de Eksjö, Karlstad, Malmö y Härnösand en 1899. Gracias a las investigaciones del Dr. Simon se puede establecer la siguiente evolución de la radiología en los hospitales suecos (véase la próxima página):

Cuadro 7:2 Los primeros aparatos röntgen en los hospitales suecos

Hospitales	Primer año	Diagnóstico	Terapia cutánea	Terapia animal
Lidköping	1897	sí	-	-
Norrköping	"	sí	sí	sí
Växjö	1898	sí	algo	-
Uppsala	"	sí	sí	sí
Linköping	"	sí	sí	sí
Eksjö	1899	sí	-	-
Karlstad	"	sí	sí	algo
Malmö	"	sí	sí	sí
Härnösand	"	sí	-	-
Sabbatsberg, Sthlm	1900	sí	sí	sí
Nyköping	"	sí	sí	-
Serafimerlas, Sthlm	1901	sí	sí	sí
Sahlgrenska sj. Gbg	"	sí	sí	sí
Kristianstad	"	sí	sí	?
Falun	"	sí	sí	sí
Lund	"	sí	sí	sí
Visby	1902	sí	-	-
Vänersborg	1903	sí	algo	-
Landskrona	"	sí	-	-
Trelleborg	1904	sí	?	-
Helsingborg	"	sí	sí	sí
Västerås	"	sí	sí	-
Jönköping	1905	sí	sí	algo
Örebro	1906	sí	sí	sí
Simrishamn	"	sí	-	-
Östersund	"	sí	-	-
Halmstad	"	sí	-	-
Varberg	"	sí	algo	-
Luleå	"	sí	algo	algo
Sala	"	sí	sí	sí
Gävle	"	sí	sí	-
Lovisas barnsj. Sthlm	1907	sí	-	-
Karlskrona	"	sí	-	-
Örnsköldsvik	"	sí	sí	-
Västervik	"	sí	sí	-
Sollefteå	"	sí	-	-
Sundsvall	1908	sí	?	?
Ängelholm	"	sí	-	-
Ersta, Sthlm	"	sí	-	-
Karlshamn	"	sí	sí	-
Vadstena	1909	sí	algo	-
Borås	"	sí	-	-
Alingsås	"	sí	sí	-
Radiumhemmet, Sthlm	1910	sí	sí	sí

8 | Radioactividad natural

Volvamos a enero de 1896. El profesor Röntgen ha dado a conocer su descubrimiento de los notables rayos “que muestran los huesos cuando se fotografían los brazos”. Hasta ese momento la relación de los investigadores con la ciencia era, más o menos, como la que inspiró la descripción de Julio Verne sobre los colonos en la isla misteriosa. Newton y Maxwell habían descubierto los últimos secretos de la naturaleza, la ciencia ahora lo sabía todo. Solo restaba un trabajo de limpieza intelectual, un acabado o alisadura y una sistematización. Diderot y d’Alembert habían mostrado el camino con su gran *Encyclopédie* sobre los avances de la razón. El momento era maduro para la enciclopedia definitiva acerca de todo el conocimiento. El ser humano había alcanzado el objetivo del saber.

Pero no era así. Durante la noche del 8 de noviembre de 1895 Wilhelm Conrad Röntgen había descubierto lo inimaginable y encontrado la llave de la puerta que se abría ante un abismo infinito y una nueva concepción del mundo. El descubrimiento de Röntgen puso en movimiento un alud de nuevas ideas. Investigadores de todo el mundo comenzaron a buscar algo que nadie se hubiera podido imaginar antes.

Los rayos de Röntgen provenían de la pared de vidrio del tubo de rayos catódicos, la que era impactada por éstos y generaba fluorescencia. Es sabido que ciertas sustancias también muestran fosforescencia. La fluorescencia y la fosforescencia son formas especiales de la *luminiscencia*, que es el nombre genérico para toda clase de emisión de luz que no dependa de alta temperatura⁽¹⁾. La fluorescencia implica que la sustancia fluorescente emita luz prácticamente de inmediato, cuando se suministra alguna forma de energía radiante, por ejemplo, la radiación Röntgen. En la fosforescencia continúa la emisión de luz durante un buen rato después de que el suministro de energía haya finalizado. La fosforescencia recibe su nombre del fósforo blanco que ilumina la oscuridad (la palabra “fósforo” proviene del griego *fos* = luz y *foros* = portador), pero la luz del fósforo no depende de la fosforescencia sino de un tipo de luminiscencia, la luminiscencia química, como consecuencia de una oxidación lenta.

Si los rayos X provienen de una pared de vidrio donde hay fluorescencia, ¿no sería posible que las sustancias que fosforescen después del suministro de energía, por ejemplo la iluminación con luz solar, también emitan radiación Röntgen? Era en todo caso una idea que el profesor *Henri Becquerel* (1852—1908) consideró que debía ser vista en mayor profundidad. El 20 de enero de 1896 el famoso matemático y naturalista francés *Henri Poincaré* (1854—1912) habló sobre el descubrimiento de Röntgen ante la Academia de ciencias francesa.

Poincaré tenía una hipótesis sobre el origen de la radiación Röntgen. “Quizá no eran necesarios los rayos catódicos”, afirmaba él: “la fluorescencia podría ser la fuente y probablemente no sería tan importante cómo ésta se origina”.⁽²⁾

Algunos investigadores ya habían comenzado a ver si las sustancias fosforescentes no podían ser también fuentes de radiación Röntgen. Se vieron fundamentalmente algunos compuestos sulfurosos que mostraban fosforescencia después de haber sido iluminados por el sol. Los resultados fueron muy contradictorios. Algunos investigadores consideraron haber demostrado que después de que esas sustancias habían sido expuestas a la luz solar, ennegrecían las placas fotográficas a través de papel negro que impedía que la luz llegara a las mismas. Otros no pudieron arribar a esos resultados.

Entre los que escucharon la conferencia de Poincaré en la Academia de ciencias francesa estaba Henri Becquerel. Él decidió ese mismo día que haría estudios minuciosos de las sus-

(1) Nota del Revisor: emisión de luz que no puede atribuirse a la temperatura del cuerpo emisor

(2) La hipótesis fue refutada por el mismo Röntgen en su segundo comunicado de marzo del mismo año. Él había demostrado que metales que no son fluorescentes emiten radiación radiológica aún más eficientemente que el vidrio.

tancias fosforescentes para ver si irradiaban radiación Röntgen. Él utilizó el mismo método que los demás investigadores: Dejó que el sol iluminara la sustancia y colocó luego una placa fotográfica de vidrio envuelta en papel negro. Becquerel tenía cierta ventaja frente a otros investigadores, ya que anteriormente había estudiado el fenómeno de la fosforescencia con su padre y contaba con una colección de diferentes sustancias fosforescentes cuyas propiedades conocía bien. La familia Becquerel es un "clan" de investigadores de física del Museo Nacional de historia natural, que se encuentra en Jardín des Plantes, cerca del Siena, en París. Allí habían trabajado anteriormente el abuelo de Henri, *Antoine Becquerel* (1788—1878) y su padre, *Alexandre Edmond Becquerel* (1820—1891), ambos eminentes investigadores.

La sustancia fosforescente que Henri Becquerel comenzó a estudiar era una sal de uranilo. La expuso a la luz solar y la dejó un instante sobre la placa fotográfica, que estaba envuelta en papel negro. Cuando reveló la placa, encontró que se había ennegrecido el lugar donde había estado la sal de uranilo. Él consideró que había confirmado así la hipótesis de Poincaré según la cual la radiación Röntgen provenía de la sustancia luminiscente. La primera comunicación de Becquerel sobre este descubrimiento fue informada el 24 de febrero de 1896.

Pero Becquerel era un investigador cuidadoso y quería repetir el experimento para que no quedara duda alguna. Envolió una nueva placa fotográfica en papel negro, pero el sol estaba cubierto de nubes y decidió esperar una nueva oportunidad. Dejó que la sal de uranilo anteriormente iluminada quedara sobre la placa envuelta en papel (sin dejar que fuera nuevamente iluminada), la placa estaba guardada en el cajón de una mesa. Unos días después, el 1 de marzo, decidió revelar la placa para ver si la supuesta radiación Röntgen de la sal de uranilo continuaba después de tanto tiempo, tras la primera radiación solar. Para su sorpresa se encontró con una placa muy ennegrecida. Su primera explicación fue que la emisión röntgen había sido muy prolongada después de la iluminación solar, pero cuando continuó experimentando, encontró que el ennegrecimiento de la placa era independiente de la exposición de la sal de uranilo a la luz. La sal de uranilo simplemente irradiaba por sí misma y emitía luz invisible, de la misma manera que los tubos de rayos catódicos de Röntgen. Becquerel informó esto a la Académie des Sciences el 2 de marzo de 1896.

El informe fue seguido por muchos otros y él trabajaba ahora con rapidez. En mayo pudo informar que el metal de uranio también emitía la mística radiación, que empezaba a ser llamada *radiación de Becquerel*. Lo notable era que el uranio irradiaba sin que se suministrara ninguna energía y sin que la radiación pareciera disminuir. ¿Qué clase de radiación era ésta? ¿De dónde provenía la energía? El fenómeno parecía oponerse a la primera ley de la termodinámica que dice que la suma de todas las cantidades de energía es constante y que el *perpetuum mobile* es inconcebible.

Pasarían muchos años antes de que el fenómeno pudiera ser explicado gracias a los aportes de Ernest Rutherford y Albert Einstein, entre otros. El primer paso para explicar este fenómeno fue dado un par de años después por una joven polaca, *Marya Sklodowska* (1867—1934), conocida mundialmente como *Marie Curie* o "Mme Curie".

Marya nació en Varsovia y fue la menor de cinco hermanos. Sus padres eran docentes y su madre había sido directora de una escuela de niñas antes de contraer matrimonio. La madre murió de tuberculosis cuando Marya tenía once años. Su hermana mayor había fallecido dos años antes. El padre tenía dificultades económicas, pero educó a los cuatro hijos en un entorno intelectual inusual. El señor Sklodowski tenía conocimientos sobre las ciencias naturales tales como la física y la química pero también sobre griego, latín y otras lenguas vivas como el inglés, el francés, el alemán y, por supuesto, el polaco y el ruso.

La mala situación económica obligó a los niños a ayudar a los ingresos con lecciones particulares de diferentes materias, desde matemática hasta francés. La hermana de Marya logró estudiar y obtener el diploma de médica, y otra de sus hermanas tuvo éxito como cantante. Su otra hermana, Bronya, soñaba con viajar a París y ser médica. Marya la alentó y llegaron a un acuerdo. Si Bronya viajaba a París, Marya buscaría trabajo como institutriz para ayudarla a ella y a su padre e incluso podría ahorrar algo de dinero. Tiempo después, cuando Bronya fuera médica en París, podría devolverle la ayuda a Marya para que ésta pudiera establecerse en esa ciudad.

Y así fue seis años después, cuando Bronya se casó con un médico polaco. Marya Sklodowska llegó a la casa de su hermana en París en 1891 y comenzó a estudiar en la Sorbona. Ella hizo rápidos progresos y obtuvo su licenciée ès sciences de física en 1893, y de matemática en 1894.

A comienzos de 1894 Marya, que ahora se hacía llamar Marie, obtuvo subsidios para investigar y estudiar las propiedades magnéticas de diferentes clases de aceros. Había comenzado sus investigaciones en el laboratorio del profesor Lippman en la Sorbona. *Gabriel Lippman* (1845–1921) había sido profesor de física en la Sorbona desde 1884, y había obtenido el premio Nobel de física en 1908 por un método de reproducción de los colores en fotografía basada en la interferencia de la luz.

Marie consideró que el espacio del laboratorio del profesor Lippman era insuficiente para los medios que necesitaba. Marie habló sobre esta cuestión con el físico polaco *Joseph Kowalski*, profesor de física en la universidad de Fribourg en Suiza, al que había conocido anteriormente y que se encontraba en París con motivo de su viaje de bodas. Kowalski pensó en un físico francés que quizá tuviera espacio suficiente en su laboratorio y por ello invitó a Marie a tomar el té al día siguiente. Él también pensaba en invitar a un físico francés llamado *Pierre Curie* (1859–1906).

Pierre Curie nunca había asistido a la escuela. Había sido educado en su hogar y demostró gran interés por la física y la química. Obtuvo el título de bachillerato a los 16 años y su *licencié* cuando cumplió 18. Luego había trabajado como asistente de enseñanza de física en la universidad de Mouton. Junto con su hermano tres años mayor, *Jacques Curie* (1856–1941) realizó estudios pioneros sobre las propiedades eléctricas de los cristales, lo que le permitió descubrir en 1880 la *piezoelectricidad*, es decir, la polarización eléctrica que se genera cuando determinados cristales son sometidos a tensiones o cuando son dilatados. En 1883 Pierre fue nombrado profesor asociado en la entonces recientemente creada “École de physique et de chimie industrielle de la ville de Paris”. En 1894 realizó investigaciones sobre las propiedades magnéticas de los cuerpos a diferentes temperaturas. Todo indicaba que era el hombre que Marie debía conocer.

Pierre y Marie se conocieron en la casa de huéspedes donde estaban los Kowalski y la atracción mutua fue inmediata. Sin embargo Marie dudó en contraer matrimonio. Siempre había tenido la intención de volver a Varsovia con su padre cuando obtuviera su diploma. En el verano de 1894 ella regresó a Polonia pero intercambió correspondencia con Pierre desde ese país. Le envió su fotografía y él se la mostró a su hermano. Y éste realizó el siguiente comentario:

—Ella tiene una mirada decidida, por no decir *tenaz*.

Pierre se ofreció a viajar a Polonia si ella quería casarse con él. Marie no quería que realizara ese sacrificio. En octubre regresó a París, pero todavía tenía dudas. El matrimonio tuvo lugar recién en 1895. Ese año Pierre presentó su tesis y fue ascendido a profesor de la escuela superior de física industrial y química.

Al principio Marie y Pierre vivieron una vida retirada y ella se hizo cargo del cuidado del hogar mientras estudiaba para obtener su diploma de maestra. Obtendría ese título en 1896. Pierre se ocupaba de la enseñanza y continuaba sus investigaciones sobre la piezoelectricidad.

Su reputación como investigador quizá era mayor fuera de Francia que en su propio país. Lord Kelvin era una de las personas que estaba impresionado por su trabajo y mantenía intercambio epistolar con él.

Cuando Marie finalizó sus estudios, obtuvo el permiso del jefe de Pierre, el profesor Schützenberger, para trabajar en la escuela superior de física y química. Allí finalizó en 1897 sus investigaciones acerca de las propiedades magnéticas del acero.

En los momentos en que Marie "no tenía nada que hacer", comenzó a interesarse en el descubrimiento que había realizado Henri Becquerel el año anterior. ¿Qué clase de radiación había descubierto? Marie Curie fue a ver a Becquerel y le preguntó si los nuevos rayos no eran un buen tema para su tesis doctoral. La propuesta fue aprobada y Marie comenzó sus investigaciones. Lo primero que era necesario establecer era si había más sustancias además del uranio que irradiaran rayos.

Becquerel había observado que su mística radiación convertía gases en conductores eléctricos mediante la ionización de las moléculas de gas. Al demostrar y medir la ionización en el aire se pudo estudiar tanto las propiedades de la radiación como examinar qué sustancias eran emitidas por la recién descubierta "radiación Becquerel".

Lo que sucedía cuando la radiación convertía al aire en conductor eléctrico comenzó a esclarecerse exactamente en este momento. Faraday ya había llamado *iones* a las partes de la molécula que en la electrólisis eran transportadas a los electrodos. He mencionado anteriormente que Stoney había descrito en 1891 a las cargas eléctricas, "electrones", denominándolos "átomos químicos"; en otras palabras, iones. Svante Arrhenius había presentado en 1884 su tesis sobre la disociación en soluciones salinas. En 1892 Lorentz había apoyado la hipótesis de Stoney que afirmaba que la materia contenía electrones. Dos años más tarde, J.J. Thomson había demostrado que los rayos catódicos se constituyen por electrones y en 1897 había determinado la masa del electrón y la carga eléctrica. Es interesante observar que el famoso libro de texto de física de Friedrich Kohlrausch incluso en su novena edición (mayo de 1901) no menciona ni a los "electrones" ni a la "ionización", pero sí habla de "iones" en la electrólisis.

Ya en marzo de 1896 Röntgen había demostrado que sus rayos X hacían del aire un conductor eléctrico. Los rayos Becquerel tenían la misma propiedad; ambos eran lo que actualmente denominamos radiación *ionizante*, pues extraen los electrones de los átomos de las moléculas de aire y así alteran su neutralidad eléctrica y las dejan con una carga positiva, es decir, en forma de iones.

Marie Curie utilizó un dispositivo de medición que también hacía uso de la pizelectricidad. El aparato de medición incluía un condensador compuesto por dos placas de metal horizontales paralelas. El preparado radioactivo fue colocado sobre la placa inferior. El aire entre las placas se convirtió entonces en conductor y la corriente eléctrica fue cada vez mayor cuanto más irradiaba el preparado. La placa superior estaba conectada con un par de cuadrantes en un electrómetro de cuadrantes⁽³⁾ que mostraba una lectura según la intensidad de corriente. Para hacer que el resultado de medición fuera independiente de las eventuales modificaciones de la sensibilidad del electrómetro o de la capacitancia del condensador, Marie utilizó un método cero. La modificación de la carga eléctrica en el electrómetro era compensada mediante suministro

(3) Un electrómetro es un instrumento de medición muy utilizado en su momento para medir cargas eléctricas. Está compuesto por una lámina de metal fina (electrómetro de cuadrantes) o filamentos (electrómetro de dos filamentos), que en la carga se desplazan como consecuencia de las fuerzas repelentes de Coulomb. El desplazamiento fue observado en un microscopio. El instrumento se podía calibrar para que el desplazamiento constituyera una medida de la carga. Como alternativa, tal como el instrumento fue utilizado por Marie Curie, se podía usar como indicador de cero en un procedimiento de compensación.

de una carga eléctrica a un cristal de cuarzo a través de piezoelectricidad como consecuencia de que el cristal era cargado mecánicamente y se dilataba. La carga necesaria para compensar lo indicado por el electrómetro constituyó una medida de la intensidad de la radiación.

Marie Curie comenzó a examinar todos los elementos disponibles, de los cuales algunos eran muy raros. Descubrió que además del uranio, también el torio irradiaba los místicos rayos. Descubrió también que la intensidad de la radiación era totalmente independiente de la temperatura del uranio y del torio y del estado químico. La capacidad de radiación debía ser considerada como una propiedad netamente atómica.

Una notable observación fue que el material que contenía uranio emitía más radiación que la que se podía esperar, conociendo su contenido de uranio. Esto indicaba que el mineral de uranio, además del uranio, contenía pequeñas cantidades de algún material que era todavía más radioactivo. Pierre Curie también estaba interesado en este asunto y dejó sus propios proyectos para ayudar a su esposa en sus investigaciones. Juntos comenzaron a buscar la sustancia desconocida. Marie estaba segura de que la misma existía junto con el uranio.

Partieron de la pechblenda de Joachimstal (Jáchymov) en Böhmen, en la actual República Checa. El mineral está compuesto hasta en un 75% por óxido de uranio, además de ácido silícico, hierro, calcio, bario, cobre, plomo, bismuto, tierras raras y algo de torio. Si hubiera alguna otra sustancia, su contenido debía ser muy pequeño.

El matrimonio Curie tenía una ardua tarea que realizar. Debían separar químicamente las diferentes partes constitutivas de grandes magnitudes de pechblenda. Sin embargo los animó la posibilidad de encontrar la fuente de la radiación en ciertas fracciones. En julio de 1898 dieron el siguiente comunicado en la publicación *Comptes rendus*:

Creemos que el material que hemos separado de la pechblenda contiene un metal no descrito anteriormente, cuyas propiedades recuerdan las del bismuto. Si la existencia de este nuevo metal puede confirmarse, queremos proponer que se lo denomine polonio, en homenaje al país del cual proviene uno de nosotros.

El preparado altamente radioactivo del matrimonio Curie (se creía que contenía polonio) al ser objeto de análisis espectral óptico mostró solo líneas espectrales de sustancias bien conocidas y no radioactivas. ¿Existía verdaderamente el polonio? Ahora sabemos que la cantidad de polonio necesaria para producir radiación altamente ionizante era tan increíblemente pequeña que no podía ser demostrada por otro medio que no fuera la ionización.

El matrimonio continuó incansablemente con sus separaciones químicas de cantidades cada vez mayores de pechblenda. Al día siguiente de la navidad de 1898 realizaron un descubrimiento que hizo época. Ese mismo día enviaron un comunicado a la Academia de ciencias francesa con el título *Sur une nouvelle substance fortement radioactive* ("Acerca de una sustancia nueva fuertemente radioactiva"). De esa manera era acuñada, por primera vez, la palabra "radioactiva", pero había más: habían descubierto el *radio*.

Todavía eran cuidadosos en sus términos. Escribieron que sus investigaciones habían dado resultados de acuerdo con lo que habían comunicado anteriormente, pero además "habían encontrado una sustancia nueva que tiene propiedades diferentes comparadas con la anterior". La nueva sustancia se asemejaba al bario, pero tenían motivos para creer que se trataba de una sustancia completamente nueva, y propusieron el nombre "radio"

Las cantidades de material que habían logrado separar eran, sin embargo, demasiado pequeñas para análisis convencionales y por ello la existencia del radio era todavía hipotética.

Era necesario más de la costosa pechblenda y también mayor espacio en el laboratorio. Estas eran dificultades que parecían impedir la realización de la investigación.

Marie Curie pensó en la posibilidad de utilizar residuos de la producción de uranio de Jáchymov, en lugar de pechblenda. Se había extraído el uranio de la pechblenda mediante el tratamiento con soda y ácido sulfúrico y eliminando los restos de mineral, tales como los residuos carentes de valor. Pero ¿quizá había radio allí?

Se envió una muestra y para alegría del matrimonio había incluso más radioactividad que en la pechblenda. Eran los días de la doble monarquía: durante el período 1867—1918 el imperio austriaco y el reino húngaro se unieron cubriendo gran parte de Europa. Böhmen pertenecía a Austria y el matrimonio Curie se dirigió a la Academia de Ciencias austriaca. Con su ayuda, Marie y Pierre obtuvieron varias toneladas de residuos para sus investigaciones.

Como no había suficiente espacio, trasladaron sus actividades a un galpón fuera de la escuela de la calle Lhomond. Allí trabajaron Marie y Pierre desde 1898 hasta 1902 para separar una cantidad suficiente de radio y estudiar las propiedades de la sustancia. Marie escribirá luego (en el prefacio de las obras completas de Pierre Curie, según la biografía de Eva Ramstedt):

En este galpón con piso de tierra y techo de vidrio que no nos protegía completamente de la lluvia, que en el verano hacía tanto calor como en un invernadero, con corrientes de aire y frío en el invierno, aquí pasamos los mejores y más felices años de nuestras vidas.

Los primeros años trabajaron juntos para separar el polonio y el radio pero luego dividieron las tareas. Pierre estudió las propiedades del radio y Marie realizó el arduo trabajo de obtener cantidades suficientes de sal del radio puro. En el congreso de física en París de 1900 ella pudo mostrar un preparado que sin lugar a dudas tenía un peso atómico mayor que el bario y que en el análisis espectral óptico mostraba nuevas líneas espectrales. El matrimonio obtuvo la ayuda de jóvenes investigadores y el trabajo químico fue convirtiéndose cada vez más en producción a gran escala. En 1902 Marie Curie había aislado una décima de gramo de cloruro de radio puro de toneladas de residuos de pechblenda. La existencia del radio no era ya una hipótesis sino un hecho.

Durante este período se estudió la radiación que las sustancias radioactivas emitían. Dos grandes preguntas requerían respuesta: ¿Qué clase de radiación era esa y de dónde provenía la energía que hacía posible que las sustancias radioactivas irradian ininterrumpidamente? Marie Curie formuló una hipótesis en 1900 en la *Revue Scientifique* (según Eva Ramstedt):

En la materia radiactiva predomina un estado de violento movimiento interno. Es materia en proceso de ruptura. Si es así, el radio debe perder peso constantemente...Según esta teoría, debemos suponer que las sustancias radiactivas no se encuentran en un estado químico común. Sus átomos no son estables ya que las partículas menores que ellos mismos eyectan, es decir, los fragmentos de átomos están en movimiento. La materia radiactiva está sometida a un cambio químico el cual es la fuente de esa energía radiactiva, pero no es un cambio químico común, pues algo así deja al átomo intacto. Lo que cambia en la sustancia radiactiva debe ser el átomo en sí mismo, pues es el átomo el que está vinculado a la radiactividad.

¿O sea que la radiación Becquerel estaba compuesta por fragmentos de átomos expulsados? Becquerel podía demostrar que parte de la radiación se podía curvar con ayuda de un campo magnético, al igual que en el caso de los rayos catódicos, es decir, los electrones. Otra parte se

curvaba en un grado significativamente menor. Esta última radiación tenía también menor capacidad de penetración. Alcanzaba solamente de 4 a 7 centímetros en el aire y era absorbida completamente por una capa delgada de material sólido, por ejemplo, una hoja de papel. A esta última radiación la denominamos en la actualidad radiación a (radiación alfa) mientras que la radiación que actúa como rayos catódicos muy energéticos la denominamos radiación b (radiación beta). Pero no fue Becquerel el que le dio nombre a esos rayos sino un joven físico de Nueva Zelanda, *Ernest Rutherford* (1871—1937).

Tanto el padre como la madre de Rutherford habían llegado a Nueva Zelanda a muy corta edad. Ernest nació en Brightwater, cerca de Nelson, en la isla Sur. Era un hombre inteligente, interesado en las ciencias naturales, que obtuvo luego de sus estudios un diploma académico. Gracias a una beca pudo continuar sus estudios en Inglaterra y en 1895 llegó al Trinity College en Cambridge. Allí tuvo la posibilidad de ser asistente de J.J. Thomson en el laboratorio Cavendish. Thomson se había hecho cargo de la dirección después de lord Rayleigh once años antes, contando con tan solo 27 años de edad. El laboratorio Cavendish se había convertido bajo la conducción de Thomson en una institución de fama mundial. Thomson no había cumplido todavía 40 años y Ernest Rutherford tenía tan solo veinticuatro cuando se conocieron. Thomson estaba en medio de sus estudios pioneros sobre las propiedades del electrón.

Era obvio que Thomson, después de los descubrimientos de Röntgen y Becquerel, le daría a su joven asistente la tarea de estudiar la radiación Becquerel. En 1899 Rutherford pudo informar lo siguiente: “Hay por lo menos dos tipos diferentes de radiación: una que se absorbe fácilmente y que para simplificar denominaremos radiación a, y otra que tiene mayor capacidad de penetración que denominaremos radiación b.”

Las sales de uranio emitían un tercer tipo de radiación (en 1899 todavía no se había demostrado la existencia del radio, a pesar de las investigaciones del matrimonio Curie entre 1898 y 1899). El físico alemán *Friedrich Oscar Giesel* (1852—1927) pudo demostrar en 1899 que ésta no se curvaba en un campo magnético y por eso no podía estar compuesta por fragmentos de átomos cargados eléctricamente. El francés Paul Villard (1860—1934), considerado el primero en detectar esta radiación, propuso, siguiendo el criterio de Rutherford, el nombre radiación g (radiación gamma). Pronto se descubrió que ésta tenía el mismo carácter que la radiación Röntgen.

En 1898 Rutherford había dejado el laboratorio Cavendish después de haberse postulado y obtenido una cátedra de física en la universidad McGill de Montreal con la ayuda de J. J. Thomson. Esta universidad, creada con medios provenientes de un comerciante de tabaco, tenía la mejor de las reputaciones y Rutherford logró durante casi una década que fuera aún más conocida y respetada.

Rutherford empleó como asistente a un joven estudiante de Oxford, *Frederick Soddy* (1877—1956). A finales de siglo se había descubierto que el radio y el torio emanaban gases radioactivos, las “emanaciones”. La emanación de radio (actualmente denominado *radón*) fue descubierta en 1900 por *Friedrich Dorn* (1848—1916) y estudiada por el matrimonio Curie. La emanación de torio (*torón*) ya había sido descubierta en 1899 por Rutherford, quien le dio a Soddy la tarea de estudiar sus propiedades químicas. Tanto el radón como el torón resultaron ser gases nobles, es decir, que no podían formar compuestos químicos. Ambos eran radioactivos. Además se descubrió que estos formaban a su vez nuevas sustancias radioactivas que se adherían como un revestimiento radioactivo (denominado “actividad inducida” en publicaciones anteriores) en paredes, mesas e instrumentos en la habitación donde se conservaba radio o torio. Esto era particularmente notable en los lugares en que se trabajaba con radio. Marie Curie escribió resignada (según la biografía de su hija Eve):

Cuando se estudian preparados fuertemente radioactivos deben adoptarse medidas especiales de precaución si se quieren continuar realizando mediciones sensibles. Los diferentes objetos que se utilizan en un laboratorio químico, como los que se utilizan en experimentos físicos, son todos radioactivos después de un período breve y ennegrecen las placas fotográficas a través del papel negro. El polvo, el aire en la habitación y la ropa que uno lleva puesta se convierten todos en radioactivos. El aire de la habitación pasa a ser conductor eléctrico. En el laboratorio donde trabajamos, el mal ha alcanzado una fase crítica y ya no podemos mantener a los aparatos eléctricamente aislados.

Pronto se descubrió que tanto las emanaciones como los revestimientos radioactivos no eran tan persistentemente radioactivos como el radio y el torio. Su intensidad radioactiva disminuía con el paso del tiempo mientras que la disminución en el caso del radón y el torón era exponencial, es decir, la intensidad radioactiva tardaba siempre el mismo tiempo en reducirse a la mitad de la indicada al momento de comenzar a medirla. Lo mismo sucedía con el polonio. Sin embargo la intensidad de los revestimientos radioactivos no disminuía con igual regularidad.

En 1902 Rutherford y Soddy presentaron una “teoría de la transformación” según la cual los átomos de las sustancias radioactivas eran considerados inestables, por lo que durante cada pequeña unidad de tiempo dt existe una probabilidad característica de la sustancia λdt de que ese átomo se desintegre. Si existen N átomos presentes en la sustancia, entonces la cantidad (dN) que se desintegraría durante el tiempo dt sería:

$$dN = -\lambda N dt \quad (8.1)$$

Esto conlleva a una disminución exponencial de la cantidad de átomos radioactivos (y con ello la intensidad de la radiación), de tal modo que la cantidad de átomos radioactivos $N(t)$ a que se reduce la cantidad inicial N_0 después del tiempo t será:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (8.2)$$

El período de semidesintegración $T_{1/2}$ es el tiempo después del cual la cantidad de átomos radioactivos se ha reducido a la mitad. O sea $T_{1/2} = 0,693/\lambda$ en el que 0,693 es el logaritmo natural de 2 (es decir, $\ln 2$). Que la cantidad de átomos radioactivos ha disminuido a la mitad no significa que existan menos átomos, sino que la mitad ha perdido su propiedad radioactiva.

El período de semidesintegración y la *constante de desintegración* (λ) se convirtieron en atributos característicos de los tipos de átomos radioactivos. Se pudo demostrar que la más complicada intensidad radioactiva decreciente del revestimiento radioactivo era acorde con las desintegraciones exponenciales simples de varias sustancias radioactivas diferentes, que juntas formaban el revestimiento. Se puso de manifiesto que diversas sustancias radioactivas se formaron sucesivamente después de que el radón (cuya radiación disminuiría con un período de semidesintegración de aproximadamente ocho días) había emanado del radio. El radio da lugar a una *cadena de desintegración de productos hija* (véase el final de este capítulo). “La desintegración” de un átomo implica que los átomos de la sustancia se convierten en átomos de otro tipo.

Rutherford y Soddy le habían dado la estocada a la vieja idea acerca de que los átomos eran como las piedras fundamentales indivisibles de la estructura de la materia. Lo que los alquimistas habían soñado, demostraba ahora ser posible. Los átomos podían convertirse y no eran indivisibles.

La naturaleza de los rayos de Becquerel continuó desconcertando a los investigadores durante un tiempo más. Sin embargo, Becquerel había demostrado en 1900 que el valor de e/m , es decir el cociente entre la carga eléctrica de las partículas y su masa era igual tanto para las partículas cargadas eléctricamente de los rayos b como para los electrones. Pronto hubo pocas dudas de que los rayos b estaban compuestos por electrones. También se había establecido que la radiación g era de la misma naturaleza que la radiación Röntgen. Pero, ¿cómo era la radiación a?

Cuando la radiación a se curva por la acción de un campo magnético, lo hace en dirección opuesta a la que lo hace la radiación β . Ya que los electrones por definición tienen una carga eléctrica negativa, las partículas a deben tener una carga positiva. La curva es además significativamente menor que la de la radiación b, lo cual significaba que la masa de las partículas a o su energía cinética es considerablemente mayor.

Es hora de que el gas noble helio entre en este tema. La existencia del helio fue propuesta desde el momento en que el astrónomo francés *Jules Sínssen* (1824–1907) descubrió durante un eclipse de sol en 1868 una nueva línea espectral, tras lo cual el astrónomo inglés *Norman Lockyer* (1836–1920) propuso el nombre helio para el nuevo elemento. La existencia del helio sobre la Tierra fue constatada por primera vez en 1895, cuando *William Ramsey* (1852–1916), profesor de química del University College de Londres, junto con *William Crookes* observaron la misma línea espectral en el gas que se emitía desde el mineral de uranio. El año anterior Ramsey había descubierto junto con lord Rayleigh el gas noble argón en la atmósfera.

Era evidente que el helio estaba asociado de alguna manera a la radioactividad del radio. En 1903 Ramsay y Soddy publicaron un modelo de esquema de desintegración del radio. Lo primero que se suponía era que el helio formaba parte de él, quizá como un producto final. En el libro del catedrático P.G. Laurin de 1904, *Sobre el radio y otros elementos activos (Om radium och öfriga aktiva ämnen)*, se lo describía de la siguiente manera:

Cuando, por ejemplo, un átomo de radio estalla, se emite una partícula a y el restátomo es un átomo de la emanación. Cuando este restátomo vuelve a estallar, se emite nuevamente una partícula a y el restátomo es ahora un átomo de la ex-emanación. Cuando éste estalla, se emiten partículas a y b, y también se generan rayos g; entonces se forma un restátomo que, según el descubrimiento de Ramsay-Soddy es un átomo de helio. Probablemente tengan lugar varios estallidos entre ellos, en los cuales se forma la ex-emanación del radio y helio, pero todavía no se sabe mucho al respecto o sobre los elementos que se generan y por eso no se los menciona. ^{(4), (5)}

En 1904 todavía no estaba claro el lugar del helio y la identidad de la radiación a, si bien Rutherford tenía muchas sospechas de que era el helio el que constituía la radiación a. Él descubrió en 1907 que el cociente e/m para las partículas de la radiación a era mucho menor que el cociente equivalente para el átomo de hidrógeno cargado positivamente (ionizado). O bien la masa era significativamente mayor o la carga era menor, lo cual parecía poco probable. Rutherford esperaba que las partículas a fueran átomos ionizados con un peso atómico de entre 2 y 4 ⁽⁶⁾.

(4) Al mencionar “un átomo de la emanación” se consideraba que se estaba hablando de un átomo de radón y con “ex-emanación” se hacía referencia al átomo que se forma en la desintegración del radón.

(5) Nota del Revisor: Ramsay y Soddy descubrieron en 1903, por medios espectroscópicos, que el helio se producía en el decaimiento radiactivo de una muestra de bromuro de radio y que también aparecía en el decaimiento de la emanación.

(6) Nota del Revisor: En el año 1908, Rutherford llegó a la conclusión que las partículas alfa y las emisiones descubiertas por Ramsay y Soddy eran lo mismo: los núcleos de átomos de helio, con carga eléctrica positiva.

Mientras esta investigación continuaba, Marie Curie presentaba su tesis en 1903. Ese mismo año se entregó el premio Nobel de física a Becquerel y al matrimonio Curie. Los Curie estaban muy comprometidos con su labor y demasiado cansados para viajar a Estocolmo a recibir el premio. En su lugar el rey Oscar II hizo entrega del galardón al embajador francés. Pierre pudo presentarse y dar su discurso ante la Academia de Ciencias sueca recién el 6 de junio de 1905. Acerca de esta visita Pierre le escribió a un amigo lo siguiente (según la biografía de Marie Curie, escrita por su hija Eve):

Mi esposa y yo hemos realizado un viaje encantador a Suecia. Fuimos libres de preocupaciones y fue un descanso para nosotros. Apenas había gente en Estocolmo en junio y eso facilitó mucho los aspectos oficiales de la cuestión.

Suecia está compuesta por lagos y bahías con algo de tierra firme alrededor; pinos, suelo de morena y cabañas pintadas de rojo. Es un paisaje bastante uniforme pero muy bello y tranquilo. Nunca se hizo de noche durante nuestro viaje y el sol otoñal brillaba casi constantemente.

En su discurso ante la academia, Pierre Curie disertó sobre las peligrosas propiedades del radio:

Uno puede imaginarse que el radio podría ser muy peligroso en manos criminales, y aquí deberíamos preguntarnos si la humanidad tiene algo para ganar al descubrir los secretos de la naturaleza, si está madura para obtener provecho de ellos y si este conocimiento no es dañino. El ejemplo de los descubrimientos de Nobel es característico: Las sustancias explosivas poderosas han permitido que el ser humano realice un trabajo admirable. También son herramientas de destrucción terribles en manos de los grandes criminales que llevan a los pueblos hacia la guerra. Estoy entre aquellos que creen, como Nobel, que los nuevos descubrimientos traerán más daños que beneficios a la humanidad.

Cuando Pierre Curie supo que los investigadores alemanes Giesel y *Walkhoff* habían descubierto que las sustancias radioactivas tenían consecuencias fisiológicas, decidió probarlas en su propio cuerpo. Expuso intencionalmente su brazo a la radiación del radio y luego informó a la Academia de Ciencias lo que había observado (según Eve Curie):

La piel comenzó a enrojecer en una superficie de seis centímetros cuadrados; la apariencia es la de una quemadura, pero la piel no me dolía o me dolía muy poco. Al cabo de cierto tiempo, el enrojecimiento, aunque sin extenderse, se hizo más intenso. Al vigésimo día se formaron costras, luego una llaga que cubrimos con vendajes. El cuadragésimo segundo día, la epidermis comenzó a regenerarse por los bordes hasta llegar al centro. Cincuenta y dos días después de la acción de los rayos queda aún en estado de llaga una superficie de un centímetro cuadrado, que adquiere un aspecto grisáceo, indicando una necrosis más profunda.

Puedo añadir que la señora Curie, después de llevar consigo algunos centigramos de una sustancia muy activa en un tubo pequeño cerrado, presentó quemaduras semejantes a pesar de que el tubo había estado sellado en un estuche de metal. Una exposición que duró menos de media hora generó después de quince días una mancha roja, que dejó una ampolla similar a una quemadura superficial que se curó recién después de otros quince días. Estos datos muestran que la duración del desarrollo de los cambios varía con la intensidad de los rayos activos y la duración del proceso que los genera. Además de esos difíciles efectos hemos tenido otros en nuestras manos durante nuestra investigación con productos muy activos. La piel de las manos muestra una tendencia general a

descamarse. Las puntas de los dedos que han sostenido tubos o cápsulas con preparados muy activos se endurecen y a veces duelen. La inflamación en las puntas de los dedos duró en uno de nosotros aproximadamente dos semanas y finalizó cuando la piel se escamó, pero el dolor no desapareció sino hasta dos meses después.

Los efectos biológicos fueron para bien y para mal. La radiación también podía quizá curar enfermedades. Pierre Curie estudió el efecto de la radiación en animales, en cooperación con el profesor *Charles Bouchard* (1837—1915), entre otros. La radiación demostró poder matar células tumorales y podría utilizarse para el tratamiento con rayos. Se desarrolló una técnica para recoger el radón del preparado de radio y utilizar una ampolla con radón como fuente de radiación. La técnica de tratamiento con rayos fue denominada durante mucho tiempo *Curie-terapia*.⁽⁷⁾ Fue practicada pronto por un número de médicos franceses. El radio fue un elemento codiciado con poderes sanadores místicos. Durante los primeros años el gramo de radio se vendía a 150.000 dólares. Comenzó a desarrollarse una industria para la producción de radio.

Entre 1902 y 1903 Pierre Curie mantuvo correspondencia con industriales estadounidenses de Buffalo. Esos industriales habían escrito y solicitado información acerca de la técnica para producir radio en forma pura. Pierre y Marie estaban ante una elección. Podían describir todos los procesos hasta en sus menores detalles (la tesis de Marie todavía no estaba terminada), o también podían patentar la técnica y obtener los derechos de fabricación en todo el mundo. La elección no fue sencilla. Solicitar la patente era atentar contra el espíritu científico. Veinte años más tarde, Marie Curie escribió acerca de esta cuestión (según la bibliografía de Eve Curie):

De común acuerdo con Pierre Curie decidimos no obtener beneficios económicos de nuestro descubrimiento: es por ello que no hemos solicitado patente alguna y hemos publicado los resultados de nuestras investigaciones sin restricciones, al igual que el proceso para la producción de radio. Luego les entregamos a los interesados toda la información que solicitaron. Esto fue de gran utilidad para la industria del radio, que se pudo desarrollar con absoluta libertad, primero en Francia y luego en el extranjero para que los investigadores y médicos pudieran obtener los preparados que necesitaban. De hecho esta industria utiliza hoy, casi sin modificaciones, el proceso que nosotros indicamos.

The Buffalo Society of Natural Science me ha ofrecido a mí, como souvenir, una publicación acerca del desarrollo de la industria del radio en los Estados Unidos, junto con reproducciones fotográficas de las cartas en las cuales Pierre Curie daba respuesta a las preguntas formuladas por los ingenieros estadounidenses.

El revuelo generado por el descubrimiento del radio a comienzos del siglo XX había afectado la fortaleza del matrimonio. Además Marie Curie estaba amargada porque su esposo no había obtenido ninguna cátedra con recursos apropiados, a pesar de que todo el mundo mostraba su reconocimiento. Además del premio Nobel, el matrimonio Curie había obtenido la prestigiosa medalla Davy en 1902, entregada por la Royal Society de Inglaterra (galardón creado en honor de sir Humphry Davy, el famoso químico británico). Pero más que aprecio y medallas, Pierre hubiese valorado más un verdadero laboratorio.

(7) Con relación al tratamiento de dolencias de la piel, éste fue un complemento de la entonces reciente Técnica Finsen, introducida por el danés. Finsen utilizó la radiación ultravioleta para el tratamiento de la infección producida por el bacilo de la tuberculosis en la piel (lupus vulgaris). El Instituto Finsen (Finsens medicinske lysinstitut) fue creado en 1896 y Finsen obtuvo el premio Nobel de medicina en 1903, el mismo año en que lo recibieran Becquerel y los Curie.

Pierre Curie era un investigador genial. Marie era inteligente y decidida, pertinaz y enérgica. Juntos constituían una pareja de investigadores muy eficiente. Lamentablemente la carrera de investigador se interrumpió de manera anticipada, antes de que pudiera responder a todas las grandes expectativas. Pierre era un hombre muy modesto, sin ambiciones personales. La hija Eve, que había escrito un libro sobre su madre, afirmaba lo siguiente acerca de su padre:

Él estaba libre de cualquier sentimiento relacionado con la competencia y en “la carrera por los descubrimientos” podía ser vencido por sus colegas sin que le causara irritación alguna. “¿Qué importa si yo no publiqué tal o cual trabajo, si algún otro lo ha hecho?, solía decir.

En 1905 Pierre Curie estaba bastante agotado y se quejaba del reumatismo. “Vivimos todavía la misma vida; la gente está completamente ocupada en no hacer nada”, le escribió a un amigo durante el verano (según Eve). “Ha pasado un año entero desde que pude hacer algún trabajo y no tengo ni un instante para mí mismo. Todavía no he descubierto cómo podemos protegernos contra la manera de desperdiciar el tiempo y sin embargo eso es muy importante. Desde el punto de vista intelectual, es una cuestión de vida o muerte. Mis dolores parecen provenir de alguna clase de neurastenia, más que de un verdadero reumatismo, y estoy mejorando porque me alimento mejor y estoy tomando estricnina.”

El 19 de abril de 1906 Pierre Curie había almorzado con colegas profesores en el Hôtel des Sociétés Savantes en la calle Danton. Luego pensaba visitar a su editor, Gauthier-Villars, para analizar una corrección. Pero la editorial estaba cerrada debido a una huelga. Pierre paseaba por la cargada calle Dauphine, caminando a veces por la vereda, a veces por la calzada, hasta que fue a parar detrás de un gran coche de caballos que estaba en su camino. Cerca del Pont Neuf decidió cruzar la calle. El gran coche tapaba la vista y cuando cruzó hacia el otro lado de la calle fue sorprendido por dos caballos que resoplaban a toda marcha, tirando de un coche pesado proveniente del puente. Pierre intentó agarrarse de uno de los caballos que avanzaba y cayó entre los mismos sin sufrir daños. Las ruedas delanteras también pasaron sin problema alguno, pero las traseras le destrozaron el cráneo.

Marie sobreviviría a su marido durante 28 años y realizaría importantes aportes. Fue designada profesora de la Sorbonne en 1901 y obtuvo nuevamente el premio Nobel en 1911, esta vez en química, por sus investigaciones químicas de los elementos radioactivos. Rutherford obtuvo el premio en química en 1908 por aportes semejantes y Soddy adquirió el galardón en 1921.

Esas investigaciones permitieron saber que existen elementos radioactivos en la naturaleza con períodos de semidesintegración tan lentos que han “sobrevivido” desde la creación de la Tierra. Esos elementos son fundamentalmente⁽⁸⁾ *uranio-238* (con un período de semidesintegración de 4,56 mil millones de años), el *torio-232* (con un período de semidesintegración de 13,9 mil millones de años) y el *uranio-235* (0,71 mil millones de años). En los orígenes de la Tierra, hace quizá 4,6 mil millones de años, había el doble de uranio-238 del existente ahora y aproximadamente noventa veces más de uranio-235. Del uranio natural, la parte principal es uranio-238 y aproximadamente 0,7% es uranio-235. Al momento de la creación de la Tierra quizá el 30% del uranio natural en ese entonces era uranio-235 — el uranio en la naturaleza no estaba lejos del necesario para que su calidad fuera semejante al utilizado en armas nucleares.

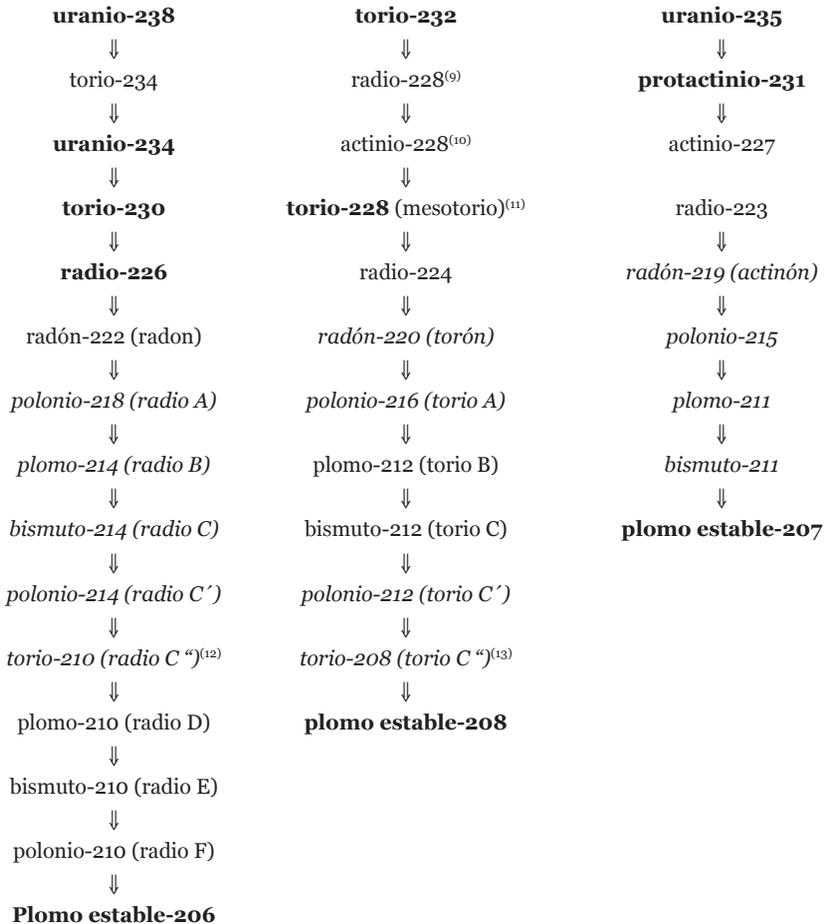
Cada uno de los tres elementos, uranio-238, torio-232 y uranio-235 genera una *cadena de desintegración radioactiva*. Las características más importantes de esas cadenas de desintegra-

(8) Ahora sabemos que en el potasio hay potasio-40 (con un período de semidesintegración de 1,27 mil millones de años).

ción aparecen en la próxima página (algunos elementos intermedios de vida corta y otros no tan importantes han sido omitidos). Los períodos de semidesintegración superiores a 1000 años han sido marcados en negrita; los inferiores a una hora han sido marcados con letra cursiva.

Durante mucho tiempo se utilizaron las viejas denominaciones “radio A”, “torio A” etc. antes de que se hubiera establecido claramente que se trataba de *isótopos* de elementos conocidos. El “isótopo” (del griego *iso* = igual och *topos* = lugar) de un elemento está referido a átomos que tienen el mismo lugar en el sistema periódico, es decir, las mismas propiedades químicas pero con diferente masa atómica. La masa atómica es indicada con la ayuda del *número másico* o *número de masa*; es el número que se menciona en los nombres de los elementos que siguen a continuación.

Las tres cadenas naturales desintegración más importantes:



(9) Nota del Revisor: radio-228 (mesotorio1)
 (10) Nota del Revisor: actinio-228 (mesotorio2)
 (11) Nota del Revisor: torio-228 (radiotorio)
 (12) Nota del Revisor: Talio-210
 (13) Nota del Revisor: Talio-208

9 | El átomo sorprendente

A comienzos del siglo XX se empezó a comprender que los átomos, esas piedras fundamentales indivisibles de toda materia, no eran pequeños granos duros e indivisibles. Se había establecido que podían emitir electrones, ser ionizados y tener cargas eléctricamente positivas. Pero, ¿dónde estaban escondidos los electrones? Era posible que existieran cargas eléctricas incluso dentro del átomo en apariencia neutral, ya que las vibraciones de alta frecuencia como consecuencia del calor generaban radiación de luz y calor que podía suponerse fueran ondas electromagnéticas.

Durante sus experimentos con rayos catódicos Lenard había bombardeado diferentes elementos con electrones, y en 1903 había llegado a la conclusión de que la materia estaba constituida fundamentalmente por vacío. Al igual que el espacio sideral, a pesar de todas las estrellas, explicó él. Al estudiar la dispersión de electrones en placas finas de metal, Lenard pudo calcular el tamaño aproximado de los átomos. En la medida en que fueran esféricos, el radio sería de algunos ångström.⁽¹⁾

En 1904 J.J. Thomson especulaba acerca de un modelo de átomo según el cual los electrones estarían distribuidos como las pasas de uva en un budín (“el modelo budín de pasas”) y luego en una distribución geométrica más uniforme dentro del átomo.

Se realizaron varias comparaciones astronómicas al respecto. En 1903 un físico teórico japonés, *Hantaro Nagaoka* (1865–1950), propuso un modelo de átomo en el que los electrones flotaban como los anillos de Saturno, alrededor de un núcleo conteniendo la masa principal del átomo, que entonces se suponía tener carga positiva. El modelo de Nagaoka cayó en el olvido ya que no se podía imaginar estabilidad con electrones que deben rechazarse unos a los otros debido a que cuentan con la misma carga eléctrica⁽²⁾.

En 1906 Rutherford realizó una interesante observación en su laboratorio en McGill, cuando estudiaba la curvatura de los rayos α en el campo magnético. Para obtener un rayo bien definido, lo dejó pasar a través de una delgada lámina, probando diferentes materiales. Permitted que el rayo bien definido diera sobre una película fotográfica para registrar la curvatura, después de que el rayo pasó a través del campo magnético. Descubrió entonces que parte del rayo se había curvado, distribuido, más de lo calculado. Debía haber sido afectado por fuerzas eléctricas muy fuertes.

Fuerzas muy fuertes, pero también había escondidas enormes cantidades de energía en los átomos. Pronto se realizaron cálculos de la cantidad de energía por unidad de tiempo (es decir, la potencia) que emite un preparado de radio. Se demostró que 1 gramo de radio emite una potencia de aproximadamente 0,1 watt. ¿De dónde provenía esta energía? ¿Existían magnitudes de energía semejantes escondidas en los átomos de otros elementos para poder ser liberadas por aquel que conociera la fórmula mágica?

Ya en 1879 sir William Crookes, el hombre detrás del famoso tubo de descarga, predijo el futuro. En una conferencia en la Royal Society señaló, en una comparación entre las propiedades duales de la masa y la radiación de los rayos catódicos, cuán cerca están entre sí los conceptos de masa y energía (cita extraída del libro de Ingmar Bergström y Wilhelm Forsling, *I Demokritos fotspår – En las huellas de Demócrito*):

Hemos visto que con relación a ciertas propiedades, la materia radioactiva se puede comparar con esta mesa, mientras que debajo de ella, hay otras propiedades que se asemejan más a la energía radiante. Realmente hemos rozado el límite donde la materia y la fuerza parecen sumarse

(1) La unidad ångström (Å, a veces escrita ÅE), utilizada antes como unidad de medida para longitudes muy pequeñas es de 10^{-10} metros. En la actualidad se prefiere utilizar la medida nanómetro (10^{-9} metro).

(2) Nota del Revisor: Más exactamente “debido a que cuentan con carga del mismo signo”.

mutuamente en los confines sombríos entre lo conocido y lo desconocido, lo cual ha significado para mí una particular tentación. Me atrevo a afirmar que los problemas científicos más grande encontrarán en el futuro su solución en esta frontera e incluso allí afuera. Aquí se ven para mí las realidades definitivas, sutiles, lejanas

Soddy constató en 1903, después de calcular la energía liberada, que la radioactividad del radio "libera más energía para una masa dada que lo que una reacción química conocida puede llegar a hacer. La energía en el cambio radioactivo debe por ello ser como mínimo veinte mil veces y quizá un millón de veces más grande que la energía en cada cambio molecular."

Según algunos, Rutherford habría dicho que una sucesión de transmutaciones atómicas podría hacer que todo el viejo mundo desapareciera en humo y que "algún loco en un laboratorio quizá sin comprender haga explotar todo el universo". Y Soddy afirmó en una conferencia ante el cuerpo real de ingenieros en 1904 (citado por Richard Rhode en su obra *The Making of the Atomic Bomb*):

Es posible que toda la materia pesada contenga, latente o ligada a la estructura del átomo, magnitudes de energía equivalentes a las del radio. ¡Si ellas pudieran ser envasadas y controladas, que instrumento sería para modelar el futuro del mundo! El hombre que coloque su mano en la palanca con la cual la naturaleza mezquina conduce tan inquietantemente el flujo de esta fuente de energía, esa persona podría tener un arma con la cual, si quisiera, podría destruir al mundo.

Soddy se manifestó del mismo modo en su libro *Interpretation of Radium* (1909). Lo hizo después de leer el libro *The World Set Free* que el escritor H.G. Wells (1866–1946), un hombre que compartía la capacidad de ver el futuro tal como lo hacía Jules Verne, escribió en 1914. En ese libro Wells describe una futura guerra (situada en 1956) en la que se utilizaba la bomba atómica. La bomba atómica era una amenaza para muchos, antes de que se convirtiera en una realidad.

Es una notable casualidad que Otto Hahn, 1879–1968, (quien en 1939 demostraría la posibilidad de la fisión del átomo) visitara a Rutherford en McGill para trabajar en su laboratorio durante un año. Hahn, un químico capaz, había descubierto recientemente el "radiotorium", es decir, el torio-228, un isótopo de torio de la cadena de desintegración del torio-232.

En 1907 Rutherford regresó a Inglaterra proveniente de Montreal, donde había obtenido una cátedra de física en Manchester. Tuvo como colaborador al físico alemán *Hans Geiger* (1882–1945). Rutherford comenzó a hacer planes para el trabajo en su nuevo laboratorio, y la identificación de las partículas de la radiación α tenía la más alta prioridad. En 1908 Rutherford logró demostrar definitivamente que la radiación α estaba compuesta por átomos de helio ionizados ⁽³⁾.

Una de las tareas posteriores más importantes era continuar los estudios de la distribución de las partículas α . Esa investigación condujo a notables descubrimientos, pero para comprender sus consecuencias debemos conocer otra que estaba teniendo lugar simultáneamente.

Es hora de incluir la teoría de la relatividad de Einstein y la física cuántica en este relato. Ingresamos en una zona donde el "sentido común" ya no orienta, simplemente porque los físicos deben postular relaciones que son contrarias a nuestra experiencia, tal como se ha descrito en las concepciones del mundo de Galileo y Newton. A fines del siglo XVIII y principios del XIX nuestra experiencia estaba relacionada con movimientos a velocidades moderadas. Rección al estudiar los rayos catódicos se supo que las partículas se movían a velocidades cercanas

(3) Nota del Revisor: Más exactamente, las partículas α son núcleos de átomos de helio.

a la de la luz. Para ellos la vieja concepción del mundo no es válida. Otro problema surgió al comenzar a estudiar mejor las consecuencias de las ecuaciones de Maxwell para las relaciones entre los campos eléctricos y magnéticos.

Pero veamos primero lo que convenimos en llamar “la concepción del mundo de Newton”. Toda la experiencia nos decía que las leyes de la naturaleza rigen independientemente de quién las observara y sin que importara dónde y cuándo esta observación tuviera lugar. Veamos un ejemplo.

Supongamos que nos encontramos en un tren que se mueve a la velocidad v medida en metros por segundo. En uno de los pasillos de los vagones dejamos rodar una pelota en la misma dirección hacia la que se dirige el tren⁽⁴⁾ y medimos la velocidad de la pelota con relación al sistema móvil, es decir, el tren. Descubrimos que la velocidad de la pelota es de u metros por segundo.

Nuestro sentido común nos dice que un observador que estuviera parado en el suelo fuera del tren vería que la pelota, si ésta fuese visible, se movería más rápido que el tren con relación al suelo, con una velocidad de $(v + u)$ metros por segundo. Si hubiéramos hecho rodar la pelota con la misma velocidad (en relación con el tren) en dirección opuesta⁽⁵⁾, el observador fuera del tren establecería que la velocidad de la pelota con relación al suelo habría sido de $(v - u)$ metros por segundo. Si hubiéramos hecho rodar la pelota a la velocidad $u = v$ el observador fuera del tren habría pensado que la pelota estaba inmóvil.

Podríamos haber marcado puntos de referencia dentro y fuera del tren e incluido una escala de tiempo poniendo en marcha un cronómetro que mostrara el tiempo $t = 0$ justo cuando el último vagón del tren pasara una marca en el suelo. Después podríamos medir la distancia x (metros) a lo largo del riel en el suelo hasta algún punto marcado a lo largo del tren. La distancia x debería aumentar con el tiempo, por supuesto, ya que suponemos que el tren se mueve hacia adelante a una velocidad v . Justo cuando ponemos en marcha el cronómetro y el tiempo $t = 0$ resulta que $x = x_0$ metros. En un momento posterior, t segundos después de que pusimos en marcha el cronómetro, es $x = x_0 + v \cdot t$ metros.

Nuestra marca en el tren no se ha movido con relación al extremo del mismo, por lo cual la distancia hasta allí es todavía de x_0 metros. No solo la distancia hasta nuestro punto marcado, sino todas las distancias dentro del tren, serán x' metros contados desde su extremo:

$$x' = x - v \cdot t \text{ metros} \quad (9.1)$$

si x es la distancia que medimos fuera del tren, a lo largo de los rieles, desde el punto donde pusimos en marcha el cronómetro. Además hemos supuesto más o menos inconscientemente que un cronómetro en el tren muestra el mismo tiempo que un cronómetro en el suelo, es decir, $t' = t$. Suponer que el cronómetro mostraría diferentes tiempos sería contrario al sentido común.

Nuestra fórmula (9.1) indica lo que podemos llamar una “transformación de Galileo”. Podemos transferir las determinaciones de posición y tiempo de nuestro sistema “fijo” a otro sistema móvil. Nuestro sentido común nos dice también que las leyes naturales deben ser las mismas independientemente de si observamos un proceso en uno u otro sistema. También se descubrió que lo mismo ocurre en tanto la velocidad v sea constante y pequeña con relación a la velocidad de la luz.

Pero si todas las leyes naturales rigen tan bien en uno como en otro sistema, entonces no

(4) Nota del revisor: “en la misma dirección y sentido de movimiento del tren”

(5) Nota del revisor: “en la misma dirección pero con sentido opuesto al movimiento del tren”

tenemos posibilidad alguna de decidir cuál está en movimiento y cuál está fijo. La mayoría de nosotros seguramente ha estado en un tren en una estación cuando hay otro junto al nuestro. De repente ese tren comienza a “moverse”, sin que podamos establecer si es el nuestro o el otro el que se mueve. Para ello debemos mirar a través de la ventana y encontrar un punto “fijo”, como por ejemplo, el edificio de la estación. La imposibilidad de establecer qué es el “reposo absoluto” y aquello que se mueve podemos denominarla “teoría de la relatividad newtoniana”. No es contraria al sentido común, pero sí posiblemente a viejos prejuicios.

En mi ejemplo aparecen dos sistemas, el tren móvil y el suelo inmóvil. Aquello que es “móvil” o “inmóvil” es arbitrario. Para nosotros es natural considerar al suelo como inmóvil, ya que la tierra está llena de montañas, caminos, casas y plantas que no se mueven en relación a sí mismos y por eso construyen todos juntos un sistema de referencia práctico. Pero si vemos a la Tierra desde una perspectiva más amplia es más racional afirmar que la Tierra se mueve alrededor del Sol que sostener lo contrario. El Sol exige ser nuestro punto de referencia fijo solo gracias a su tamaño, aun cuando alguna vez afirmar que la Tierra no era el punto fijo de la existencia fue considerado un pensamiento hereje. Si comparamos nuestro sistema solar con otros en el universo, sería más difícil afirmar que algo es inmóvil y que por ello es un punto de referencia natural.

El deseo de tener un punto fijo siempre fue importante y durante varios siglos el *concepto éter* ofreció esa referencia. Desde el momento en que Huygens se imaginó la luz como una onda en el siglo XVII, se especulaba con un medio, el éter, que llenaría el espacio sideral y a través del cual las ondas podrían propagarse. Maxwell había dado como un hecho la existencia del éter.

Pero si el éter existía, la Tierra durante su movimiento alrededor del Sol debía moverse a través del éter y por ello estaría expuesta a un “viento del éter”, de la misma manera que un objeto que se mueve a través del aire está expuesto al viento. Aquí existía la posibilidad de realizar un experimento. Y lo realizaron dos físicos estadounidenses, *Albert Michelson* (1852–1931) y *Edward Morley* (1838–1927). Michelson ya había intentado demostrar en 1881 la existencia del viento del éter, pero el experimento que pasó a la historia fue el que realizó en 1887 junto con Morley. Si el viento del éter existía, la luz debía moverse con la velocidad de la luz c perpendicularmente a la dirección del movimiento de la Tierra, con la velocidad $c-v$ en su dirección de movimiento y con la velocidad $c+v$ en dirección opuesta⁽⁶⁾ si se supone que la Tierra se mueve a la velocidad v a través del éter. La velocidad de la Tierra alrededor del Sol es de aproximadamente 30 kilómetros por segundo, lo cual equivale a $1/10000$ de la velocidad de la luz. La diferencia entre $c-v$ y $c+v$ es por ello de aproximadamente $0,02\%$ y debía ser posible demostrarlo.

Michelson y Morley utilizaron un dispositivo en el que un haz de luz de una fuente de luz monocromática⁽⁷⁾ dividía en dos al haz que viajaba en diferentes trayectorias, perpendicularmente entre sí, y que con la ayuda de espejos se reflejaban un número de veces y luego convergían hasta superponerse mutuamente. Si las ondas de luz estuvieran en fase, se fortalecerían mutuamente pero si funcionaran diferente, darían una interferencia que podría medirse en un *interferómetro*, un instrumento óptico con el que se pueden medir patrones de interferencia. Como el dispositivo flotaba en mercurio, se lo podía rotar de tal manera que un haz de luz podía tener una trayectoria en dirección a la órbita terrestre o en dirección opuesta. Con el montaje del experimento se hubiera podido demostrar un viento del éter de 30 metros por se-

(6) Nota del Revisor: con la velocidad $c-v$ en su misma dirección y sentido de movimiento, y con la velocidad $c+v$ en su misma dirección pero en sentido opuesto

(7) Nota del Revisor: Se utilizó un espejo semitransparente para dividir en dos partes el haz

gundo, es decir, una milésima de la velocidad de la Tierra, pero no se encontraron diferencias de tiempo entre ambas direcciones. El viento del éter no existía.

Si hubiera habido un viento del éter, el camino de la luz en dirección del movimiento de la Tierra se habría contraído en la relación γ , una contracción que no se pudo comprobar. Una posible explicación podía haber sido que el éter siguiera a la Tierra y rotara alrededor del Sol. Otra explicación fue expuesta en 1892 por el físico irlandés *Francis FitzGerald* (1851–1901), quien afirmaba que el viento del éter ejerce una presión que genera una contracción de longitudes que compensa la esperada contracción del camino. Sin embargo existían explicaciones más convincentes, a partir de estudios sobre las consecuencias de las ecuaciones de Maxwell.

El hecho de que las leyes naturales tengan la misma forma tanto con uno como con otro sistema sin que podamos afirmar que alguno de los mismos está en reposo, puede expresarse con un término matemático: las leyes son *invariantes* en la transformación de Galileo clásica. Un ejemplo es la masa de un cuerpo, m , que en la invariancia siempre es la misma en cada sistema y también lo son las expresiones para su energía cinética $= \frac{1}{2} m \cdot u^2$ y para su cantidad de movimiento $m \cdot u$, si u es la velocidad del cuerpo en el sistema.

Cuando se buscó explicaciones al resultado del experimento de Michelson–Morley, la concepción del mundo cambió. Se pudo, por cierto, demostrar que también las leyes eléctricas y magnéticas tenían la misma forma independientemente del sistema de referencia, pero si se realiza una transformación de Galileo del espacio (por ejemplo, $x' = x - v \cdot t$, $y' = y$, $z' = z$) y el tiempo ($t' = t$) aparece en las ecuaciones de Maxwell términos que contienen la velocidad relativa entre los dos sistemas. Esto significaría que las ecuaciones originales no son invariantes para la transformación de Galileo. Sin embargo, en ese caso no regiría la relatividad newtoniana y sería posible ver diferencias entre los diferentes sistemas de referencia y, mediciones mediante, establecer en cuál se encontraba.

Para conservar el principio de relatividad se podía imaginar en modificar las leyes del electromagnetismo o abandonar la transformación de Galileo. La primera opción no parecía poder realizarse de manera práctica. La segunda era posible, lo cual fue demostrado en 1904 por el físico holandés Hendrik Lorentz que reemplazó la transformación de Galileo con *la transformación de Lorentz*:

$$x' = \frac{x - v \cdot t}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (9.2)$$

$$x' = \frac{x - v \cdot t}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (9.3)$$

Ahora la teoría había dejado de lado el sentido común, pero con la transformación de Lorentz las ecuaciones de Maxwell eran invariantes y se conservaba el principio de la relatividad de Newton (todas las velocidades son relativas). La transformación de Lorentz explicaba también el resultado Michelson–Morley. Un cuerpo en movimiento relativo se contrae en la dirección del movimiento, tal como se describe en la expresión (9.2) para la distancia $x'^{(8)}$. Esta contracción, en consonancia con lo que había propuesto FitzGerald, se denomina *contracción*

(8) Nota del Revisor: La longitud de un cuerpo en movimiento con velocidad constante relativa a un sistema de referencia S , medida desde ese sistema de referencia, se contrae en la dirección del movimiento tal como se describe en la expresión (9.2) para la coordenada x'

de Lorentz y es una consecuencia directa del intento de hacer invariantes las ecuaciones de Maxwell en la transformación.

Las ecuaciones (9.2) y (9.3) conllevan un número de conclusiones sorprendentes. También el tiempo es relativo. Puesto que ya no es $t' = t$, no existe un tiempo universal; además el tiempo y el espacio están imbricados (la distancia $x^{(9)}$ está incluida en la expresión [9.3] para el tiempo). El tiempo será entonces una cuarta dimensión además de las tres dimensiones espaciales, algo que fue desarrollado, entre otros, por el matemático alemán *Hermann Minkowski* (1864–1909).

Sería Albert Einstein quien vería claramente las consecuencias de la propuesta de Fitzgerald y Lorentz e incorporaría la transformación de Lorentz en la *teoría de la relatividad especial*. La teoría de la relatividad de Einstein ha sido objeto de amplia publicidad y ha sido presentada como algo tan complicado que incluso profesores eminentes abandonan llorando las salas de conferencia donde se la presenta. Es una ilusión. En la medida en que un profesor llora, eso se debe seguramente a que creía que no la podría comprender, pero no lo había intentado. El principio de la relatividad no es ningún descubrimiento que haya realizado Einstein sino que existía ya cuando se vio la dificultad de contemplar algo en reposo absoluto. La relatividad del tiempo no fue demostrada por Einstein sino que fue una consecuencia de la teoría de Lorentz. Lo que Einstein realizó fue extraer conclusiones más importantes de la transformación de Lorentz que aquellas a las que había arribado Lorentz mismo. Su razonamiento, que pronto intentaré relatar, es revolucionario pero no es difícil de seguir.

Albert Einstein nació en Ulm el 14 de marzo de 1879 y creció en Munich. Las historias lo describen con frecuencia como un alumno algo retrasado, pero no hacen honor a la verdad. Albert tenía altas calificaciones, a veces las más altas, en matemática y latín, tanto en los grados inferiores como en la escuela secundaria. Leía a Kant y Darwin y matemática por su cuenta, al margen de los estudios. Pronto se desilusionó de las religiones cuando su conocimiento de las ciencias naturales le dijo que los relatos de la Biblia no podían ser estrictamente ciertos. En su juventud estaba indignado por la manera en que el estado, según él pensaba, confundía a la juventud con mentiras. Su rebeldía juvenil lo llevó a descreer constantemente de las autoridades y asumió una actitud escéptica ante los pronunciamientos y los dogmas.

Después del fracaso de los negocios de su padre, la familia se trasladó a Milán, mientras que Albert, quien entonces tenía 15 años, permanecía en Munich para finalizar la escuela secundaria. Sin embargo, no terminó sus estudios, ya que fue expulsado como consecuencia de su naturaleza rebelde: él odiaba la disciplina alemana. El joven viajó entonces a Zurich para finalizar sus estudios en la escuela secundaria y convenció a su padre para que solicitara a las autoridades germanas la renuncia a su ciudadanía alemana, que finalmente tuvo lugar en enero de 1896. En 1901 se convirtió en ciudadano suizo. Todo el tiempo trató de conservar algo de su niñez y su oposición a las normas y exigencias de los adultos. Más tarde le escribiría a un amigo lo siguiente:

A veces me pregunto cómo pudo ser posible que justamente yo fuera quien desarrollaría la teoría de la relatividad. La causa, creo, es que un adulto común nunca se detiene a pensar en los problemas con el espacio y el tiempo. Son cuestiones que pensé cuando era un niño. Pero mi desarrollo intelectual fue tardío y por eso comencé a pensar en el espacio y el tiempo recién cuando fui adulto.

(9) Nota del revisor: Más exactamente: la coordenada x

Desde 1902 a 1909 Einstein trabajó en la oficina de patentes de Zurich. Durante ese tiempo, cuando tenía entre 23 y 30 años, aparecieron algunos de sus trabajos más importantes. Publicó tres artículos sobre el *movimiento browniano*. Se trata de un movimiento aleatorio que parecen tener pequeñas partículas al ser observadas, por ejemplo, las partículas de humo en el aire como partículas en suspensión en una solución. El movimiento puede ser estudiado en el microscopio y fue descrito por primera vez en 1827 por el botánico inglés *Robert Brown* (1773—1858).

Einstein explicó el movimiento browniano como el resultado de incesantes impactos de las moléculas en el aire o en líquidos, donde las moléculas están en movimiento térmico. La consecuencia es que las partículas de polvo reciben impactos, lo cual explica su curso brusco y sus trayectorias aleatorias. Por primera vez existía aquí una prueba evidente de que las moléculas existen como partículas libres.

En un capítulo anterior ya he mencionado la descripción de Einstein del efecto fotoeléctrico. Él explica allí, lo que en apariencia es extraño, que la frecuencia ν de la radiación incidente y no su intensidad es lo que determina la energía de los electrones que la radiación libera desde el medio irradiado. Einstein demostró que la energía cinética E_k de los electrones puede ser calculada como

$$E_k = h\nu - W \quad (9.4) \qquad \text{ver también (4.7)}$$

donde h es la constante de Planck y W es la cantidad de energía necesaria para liberar al electrón.

Pero fue fundamentalmente la deducción de la *teoría de la relatividad especial* lo que constituyó el gran aporte de Einstein durante los años en Zurich. Einstein formularía más tarde la teoría de la relatividad *general*. Muchos se confunden con los nombres y creen que la palabra “especial” implica que la primera teoría es más complicada. En realidad la palabra significa que la teoría está limitada al caso especial del movimiento rectilíneo y uniforme con velocidad constante entre los sistemas de observación. La teoría de la relatividad general fue un intento de generalizar la teoría especial para que fuera válida para toda clase de movimiento, y por consiguiente, para un sistema acelerado.

Einstein pensó, al igual que lo había hecho anteriormente Lorentz, acerca de la carencia de invariancia de las ecuaciones de Maxwell con la transformación galileana. Él partía de otra hipótesis. Una consecuencia de las ecuaciones de Maxwell es que los cambios de las intensidades de campo en el vacío se propagan como una onda esférica con la velocidad de la luz c independientemente del sistema en el que se encuentre el observador. Esta es otra hipótesis contraria al sentido común. Desde una fuente luminosa en movimiento con velocidad v , la luz observada desde un punto “fijo” se mueve con la velocidad c en todas direcciones y no con la velocidad $v+c$ en una dirección y $v-c$ en la opuesta, a pesar de que un observador que se mueva con la fuente luminosa también consideraría que la luz se mueve con la velocidad c en todas direcciones.

Einstein investigó las consecuencias de esta hipótesis, es decir, si la velocidad de la luz es constante.⁽¹⁰⁾ La hipótesis nos dirige a la transformación de Lorentz, que Einstein dedujo de una manera más elegante que el mismo Lorentz.

La transformación de Lorentz hace invariantes a las ecuaciones de Maxwell, es decir, tienen la misma forma en todos los sistemas de observación con velocidad relativa constante. Ahora aparecía una dificultad nueva. Con la transformación de Lorentz las leyes mecánicas del mo-

(10) La velocidad de la luz (c) en el vacío es desde 1983 y por definición, de exactamente 299.792.458 metros por segundo. Se introdujo así una nueva definición de la unidad de longitud metro: es la distancia que la luz viaja en el vacío en un tiempo de $1/299.792.458$ segundos.

vimiento dejan de ser invariantes. Esto era absurdo. Los movimientos mecánicos y los fenómenos electromagnéticos están tan íntimamente vinculados que es ilógico pensar que las leyes mecánicas no sean invariantes cuando las leyes electromagnéticas lo son.

Uno puede preguntarse cuándo se puede confiar en la lógica y el sentido común si la transformación de Lorentz es totalmente opuesta a ambos. El sentido común y la lógica son, sin embargo, dos cosas completamente diferentes. El “sentido común” apela a nuestros sentidos y nuestras experiencias. Por eso no siempre es un buen guía en regiones desconocidas. La lógica, sin embargo, exige congruencia, algo que debe cumplirse siempre. La transformación de Lorentz es contraria al sentido común, pero es una consecuencia lógica de suposiciones simples. En el caso de Einstein, una hipótesis simple: La constancia de la velocidad de la luz.

La conclusión de Einstein fue por ello que las leyes mecánicas deben ser modificadas para que sean invariantes en la transformación de Lorentz⁽¹¹⁾. Él pudo demostrar que éste es el caso no solo referido a una contracción de longitud sino también a que la masa de un cuerpo aumenta con su velocidad de tal manera que

$$x' = \frac{x - v \cdot t}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (9.5)$$

en la que m_0 es la masa en reposo del cuerpo, es decir, la masa que se puede medir cuando el cuerpo no se mueve con relación al observador. No es difícil deducir esta expresión. Se puede partir de un choque elástico entre dos partículas de igual masa y establecer la condición de que se conserve la cantidad de movimiento $m \cdot v$, independientemente de si el choque es considerado en uno o en otro de los dos sistemas de coordenadas que se mueven con la velocidad v en relación recíproca. Las relaciones entre la velocidad de los cuerpos en ambos sistemas pueden obtenerse de la transformación de Lorentz.

La expresión (9.5) pudo ser probada experimentalmente, pero para esto se exigían altas velocidades. Esas habían sido medidas para los rayos catódicos y ya había experimentos que demostraban que la masa del electrón aumenta con su velocidad. Ese aumento es claramente notable cuando la velocidad del electrón supera la mitad de la velocidad de la luz (a la mitad de la velocidad de la luz es $m/m_0 = 1.15$ según la fórmula arriba citada, es decir, la masa ha aumentado en un 15%).

El físico alemán *Walter Kaufmann* (1871–1947) se dedicó a estudiar el electrón de altas velocidades, o rayos catódicos o rayos β de preparados radioactivos naturales. En este último caso, él filtró la radiación β para obtener electrones de energía relativamente bien determinada. En 1901 descubrió que el cociente e/m disminuía cuanto mayor era la energía del electrón y a consecuencia de ello también la velocidad, y él arribó a la conclusión de que eso se debía a un aumento de la masa, más que a una disminución de la carga. Einstein descubrió aquí información que confirmaba su teoría. Gran parte de los éxitos de Einstein se deben a los experimentos de Kaufmann, si bien Einstein lo criticó porque había dado una explicación errónea al aumento de la masa observado.

En la deducción de Einstein de la expresión para la dependencia de la velocidad con la masa⁽¹²⁾, él tenía una base para continuar hacia la hipótesis más espectacular de la teoría de la relatividad especial.

(11) Nota del Revisor: Es decir, la mecánica tiene que ser revisada para que la invariancia de Lorentz reemplaza a la invariancia de Galileo.

(12) Nota del revisor: Más exactamente, la dependencia de la masa con la velocidad

La expresión

$$1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$$

se puede desarrollar en serie de una manera convencional de tal modo que

$$mc^2 = m_0c^2 + \frac{1}{2} m_0v^2 + \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4} m_0v^2 \left(\frac{v}{c}\right)^2 + \dots \quad (9.6)$$

El término $\frac{1}{2} m_0v^2$ es la expresión clásica de la energía cinética de la masa. Si omitimos los términos siguientes a éste en el desarrollo en serie, podemos interpretar la ecuación (9.6) indicando que la energía total de la partícula de masa m es la suma de la energía cinética clásica y de una cantidad de energía, m_0c^2 , que puede interpretarse como la energía en reposo E_0 de la partícula. Se puede suponer que una partícula de masa m_0 en reposo puede tener una energía en reposo que es

$$E_0 = m_0c^2 \quad (9.7)$$

Esta era una conclusión importante, única. Si la masa se indica en kilogramos y la velocidad de la luz en metros por segundo, el equivalente de energía de un kilogramo de masa será aproximadamente de $9 \cdot 10^{16}$ kg.m².s⁻². Puesto que 1 kg.m.s⁻² es por definición 1 newton, ésta es una energía de $9 \cdot 10^{16}$ newton - metro (o joule o watt-segundo) o 25 terawatts-hora (TWh). A modo de comparación puede mencionarse que una gran central nucleoelectrónica generadora de energía nuclear cuya potencia eléctrica fuese de 1000 MW, produce aproximadamente 6 TWh⁽¹³⁾ de energía eléctrica por año.

Un gramo de radio emite una potencia radiactiva de 0,1 watt. Durante la vida media del radio (la vida media es el período de semidesintegración dividido por el logaritmo natural de 2, lo cual resulta ser 1620 años/0,693 = 2338 años = $7,37 \cdot 10^{10}$ segundos) se desarrolla en total una energía de $7,37 \cdot 10^9$ watts-segundos (joule, newton-metro), o aproximadamente. 2000 kilowatts-hora por gramo: una cantidad de energía imponente. Pero para crear esta energía a partir de la masa se consumen, según Einstein, solo $7,37 \cdot 10^9 / 9 \cdot 10^{16} =$ aproximadamente, 80 microgramos.

Esa pérdida tan pequeña de masa experimenta el radio en total durante un espacio de tiempo de miles de años. ¡No es de extrañar porqué parecía que la energía en un principio provenía de la nada!

Aquí se había creado energía. Con eso se eliminaba la primera regla de la termodinámica, es decir, aquella que dice que el total de la energía en sus diferentes formas es constante y que la energía no puede ser creada ni destruida. Sin embargo esta regla se podía salvar si se contaba también a la masa de un cuerpo como energía.

Las extraordinarias consecuencias de la transformación de Lorentz y la teoría de la relatividad especial de Einstein hicieron que fueran recibidas con gran escepticismo. Todo podía ser visto como hipótesis y teorías sin vínculo con la realidad. ¿Quién podía creer que la masa y la energía eran diferentes aspectos de los mismos fenómenos, que la masa aumenta con la velocidad, que los objetos móviles se reducen y que no existe el tiempo absoluto? Todo esto se oponía al sentido común y creaba falta de credibilidad entre los teóricos y los experimentalistas. Einstein fue respetado y venerado casi al límite del culto personal, pero

(13) Nota del revisor: Más exactamente, 8,76 TWh de energía eléctrica por año

también fue objeto de burlas.

En ese contexto hay que mencionar que Einstein era judío y había renunciado a la ciudadanía alemana. Entre los experimentalistas alemanes el que más encono expresaba contra él era Philipp Lenard. Además este hombre estaba amargado por no haber sido él quien descubrió la radiación Röntgen ni el electrón antes de que lo hicieran Röntgen y J.J. Thomson, a pesar de que había trabajado durante mucho tiempo con los rayos catódicos y que, como él pensaba, había dejado la mesa servida para que otros se llevaran los éxitos. El descontento de Lenard no desapareció cuando obtuvo el premio Nobel en 1905, el año anterior al de Thomson, por sus trabajos con los rayos catódicos. Las grandes discrepancias llegaron cuando Einstein obtuvo el premio Nobel de física en 1921 y la teoría de la relatividad alcanzó mayor dominio público después de que alguna de sus consecuencias había podido verificarse experimentalmente.

La teoría de la relatividad de Einstein también fue muy maltratada por los escritores de divulgación científica, algo a lo que Einstein contribuyó en alguna medida con sus razonamientos metafísicos para poner en claro las relaciones matemáticas. De esa manera, tal como el profesor Alfred Liljeström dice en su libro *Bases científicas de la tecnología (Teknikens Naturvetenskapliga Grunder)* de 1935, “atrajo a filósofos sin formación matemática” extraviados. Liljeström continúa:

Sin embargo es imposible simplificar una teoría matemática mediante la divulgación: las matemáticas dan a través de sus fórmulas la manera de presentación más simple y concentrada. Toda circunlocución es necesariamente incompleta y engañosa.

Pero volvamos ahora a Ernest Rutherford, quien recién llegaba a Manchester. En 1908 había obtenido el premio Nobel de química. El fundamento del galardón fue “por sus investigaciones en la desintegración de los elementos y en la química de las sustancias radioactivas”, pero Rutherford era químico y vivió dichos motivos como una gran vergüenza.

Al descubrirse que las partículas α eran átomos de helio⁽¹⁴⁾, Rutherford tenía un motivo más para continuar sus estudios acerca de la dispersión de las partículas α . En el proyecto participó, además de Hans Geiger, un joven estudiante llamado *Ernest Marsden* (1889–1970). Ahora se intentaba encontrar una manera mejor de registrar las partículas α que permitir que ennegrecieran una película fotográfica. Rutherford utilizó entonces un método que anteriormente había utilizado sir William Crookes. Él había desarrollado un *espintariscopio*, un aparato compuesto por una pantalla de sulfuro de zinc y una lupa a través de la cual se podía mirar la pantalla. Cuando una partícula α chocaba contra ella, se producía una escintilación, un destello luminoso que podía observarse con la lupa, si el ojo estaba protegido de la luz.

Una manera alternativa de registrar las partículas α era a través del registro de choques de corriente eléctrica causados por la ionización que se producía en tubos llenos de gas. Los aparatos construidos sobre la base de este principio fueron también fabricados por Hans Geiger bajo la dirección de Rutherford. Esto trajo como consecuencia que Geiger y Walter Müller desarrollaran luego el contador *Geiger–Müller*, en el cual hay un tubo de metal cerrado (“*tubo GMr*”) lleno con gas a baja presión. En el centro del tubo hay un hilo metálico con un potencial eléctrico positivo de aproximadamente 1000 voltios con respecto al tubo. Si las partículas ionizadas ingresan al tubo, (el tubo debe tener en algún lugar una “ventana” muy delgada para que las partículas α puedan atravesarla) se ioniza el gas y los electrones liberados son acelera-

14 Nota del Revisor: Ver nota (1) del revisor.

dos por el campo eléctrico. Su energía cinética puede llegar a ser tan grande que son capaces de ionizar otras moléculas de gas de tal modo que un pulso de corriente eléctrica crece como un alud y puede ser registrado mediante choques de corriente en un altoparlante o en un contador electrónico o electromecánico.

Con ambos métodos de medición se podían registrar y contar algunas partículas α . Después de que Rutherford se aseguró de que el método del sulfuro de zinc brindaba un resultado igualmente confiable que el método electrónico de medición, se decidió a utilizar una pantalla de sulfuro de zinc para sus estudios sobre la dispersión de los rayos α . Con este método se podía establecer más exactamente dónde se encontraba la partícula α .

Las mediciones llevaban mucho tiempo y generaban cansancio. Los ojos del observador debían adaptarse a la oscuridad durante 30 minutos antes de que las escintilaciones pudieran ser vistas. No se podía mirar fijamente la pantalla durante más de algunos minutos por vez, ya que los ojos se cansaban y el resultado no era confiable.

Geiger y Marsden repitieron los experimentos de Rutherford en los que la radiación α pasa a través de una lámina delgada y parte de las partículas α se dispersaba un poco hacia un lado. Las observaciones no eran directamente contrarias al modelo “pudding de pasas” del átomo con su masa distribuida uniformemente sobre su volumen. Sin embargo se encontraron algunas dispersiones inexplicables que le dieron motivos a Rutherford para seguir pensando. Finalmente él propuso un experimento “sin sentido”. Le pidió a sus colaboradores que emitieran un rayo fino de partículas α con un ángulo de 45° hacia una lámina fina de oro y que colocaran la pantalla de sulfuro de zinc para que fuera impactada si las partículas α rebotaban como pelotas contra la lámina de oro. Todos estaban convencidos de que esto no iba a suceder: se partía de la base de que todas las partículas α atravesarían fácilmente la fina lámina. Sin embargo querían ser minuciosos y demostrar lo evidente.

Marsden realizó el experimento en 1909. El resultado fue sensacional. Marsden pudo mostrar algunas de las partículas α en una dirección que demostraba que efectivamente habían rebotado como pelotas contra la lámina de oro. Aún cuando Rutherford sabía intuitivamente que esto podía pasar, se sorprendió cuando realmente tuvo lugar. Él escribiría luego sobre su reacción (según Richard Rhodes):

Es el hecho más increíble que jamás haya vivido. Fue casi increíble, del mismo modo en que alguien hubiera lanzado una granada de 15 pulgadas contra una hoja de papel de seda y ésta hubiera rebotado e impactado. Cuando reflexioné me quedó en claro que esta retrodispersión debe ser la consecuencia de una única colisión, y cuando hice los cálculos encontré que era imposible lograr un efecto de ese tamaño a menos que se supusiera que la mayor parte de la masa del átomo estaba concentrada en un pequeño núcleo.

Geiger y Marsden publicaron una descripción del experimento después de algunas semanas, pero Rutherford se tomó el tiempo necesario para reflexionar acerca de las consecuencias. Él construyó modelos. Hizo que un poderoso electroimán colgara de un hilo de diez metros de largo frente a un imán fijo de la misma polaridad ubicado sobre una mesa, y estudió las desviaciones pendulares a diferentes velocidades y ángulos de incidencia cuando el electroimán era repelido por el imán fijo. Extrajo la conclusión de que lo que Geiger y Marsden habían observado exigía que la carga positiva del átomo estuviera concentrada en un volumen cuyo radio fuera una diezmilésima parte del átomo. La carga concentrada repele la partícula α con una fuerza que según la ley de Coulomb era proporcional al producto de la carga del núcleo

atómico y la partícula α . Se había descubierto el núcleo atómico.

Sin embargo esas reflexiones llevaron tiempo. Rutherford hizo público su descubrimiento recién el 7 de marzo de 1911. Lo hizo ante un público variado en una reunión de la Manchester Literary and Philosophical Society. La conferencia de Rutherford fue precedida por otra brindada por un importador local de frutas quien relató el hallazgo de una víbora extraña al recibir bananas de Jamaica, y luego mostró al ofidio.

El descubrimiento de Rutherford fue tan sensacional que estuvo muy cerca de obtener otro premio Nobel de física, el correspondiente a los años 1922–1923. La Academia de Ciencias consideró, sin embargo, que había sido honrado lo suficiente y que en esa posición el premio Nobel apenas incrementaría el brillo que había alcanzado ni tampoco le daría mejores posibilidades de investigación.

Al demostrar Rutherford la existencia del núcleo atómico, parecía que el átomo estaba compuesto por un núcleo con carga positiva rodeado de electricidad negativa, probablemente en forma de electrones. Era difícil imaginarse que pudieran girar alrededor del núcleo, como los anillos de Saturno, tal como Nagaoka había propuesto anteriormente. No existía ninguna buena teoría física acerca de cómo podían estar el núcleo atómico y los electrones en un conjunto estable. Si los electrones giraban alrededor del núcleo atómico como los planetas alrededor del sol deberían, según las ecuaciones de Maxwell, emitir energía a través de la radiación electromagnética. Pero si perdían energía serían atraídos hacia el núcleo atómico y no podrían mantener sus órbitas. Rutherford tenía gran experiencia en experimentos pero ahora se necesitaba a los teóricos. Llegó el momento de presentar a *Niels Bohr* (1885–1962).

Niels Bohr nació en Copenhague en 1885. Su padre, *Christian Bohr* (1855–1911), era profesor de fisiología en la universidad donde estudió Niels. En 1911 Niels escribió una tesis doctoral sobre la teoría del electrón de los metales, en la que demostró que no se podían explicar las propiedades magnéticas solo con la física clásica. El profesor *Christian Christiansen* (1843–1917), docente de Bohr, dijo al presentar la tesis que casi nadie en Dinamarca estaba en condiciones de evaluar correctamente el trabajo de Bohr.

Después de la presentación, Bohr recibió una beca del fondo Carlsberg y decidió viajar a Cambridge para continuar sus estudios con J.J. Thomson. Bohr estaba entusiasmado con su primer encuentro con Thomson, de poder estudiar en el famoso laboratorio Cavendish y de participar en la vida estudiantil, entre otras cosas como jugador de fútbol. En una carta dirigida a su hermano menor *Harald Bohr* (1887–1951), quien luego sería profesor de matemática en Copenhague, escribió sobre su encuentro con Thomson (según Richard Rhodes):

Si solo supieras lo que significó para mí poder hablar con ese hombre. Fue muy amable conmigo y hablamos mucho. Creo que tras la conversación él consideró que lo que dije tenía sentido. Ahora voy a leer mi tesis y él me invitó a cenar el domingo en el Trinity College. Ese día me va a hablar más al respecto de mi trabajo. Comprenderás que estoy feliz.

No está claro si Thomson leyó la tesis. Bohr había sido imprudente y no había hablado solamente sobre sus propias ideas sino que también había señalado algunos errores en la teoría del electrón de Thomson. Si fue por eso o debido a la afinidad entre ambos no queda claro, pero Bohr se sintió ignorado. Algo muy distinto sucedió cuando Rutherford en diciembre de 1911 viajó a Manchester para participar de la cena tradicional de Cavendish. La personalidad más abierta y brusca de Rutherford causó enorme impacto en Bohr, y más tarde viajaría a Manchester para encontrarse con él. Le pidió continuar sus estudios en Manchester y Ruther-

ford le propuso que lo viera a fines de marzo de 1912.

Bohr se sentía a gusto en Manchester y la afinidad personal funcionaba bien. Rutherford era tímido pero bullicioso, un hombre amable que podía dar vueltas en el laboratorio cantando o fumando su pipa, enérgico y a veces impaciente. Bohr era atlético, hacía deportes y era invencible jugando al tenis de mesa pero también en la actividad mental. Rutherford, como físico experimental, era suspicaz hacia los teóricos pero contaba con que Bohr fuera una excepción: “¡Él juega al fútbol!”

Geiger y Marsden iniciaron a Bohr en los métodos para estudiar las sustancias radioactivas y aprendió radioquímica con *George de Hevesy* (1885–1966), quien luego obtendría el premio Nobel de química en 1943. Después de la II Guerra Mundial, de Hevesy fue un visitante bienvenido en la institución de Rolf Sievert en Estocolmo, donde me reuní con él en numerosas oportunidades: un hombre amable que siempre tenía tiempo para conversar y un verdadero profesor, que olvidaba sus paraguas en todos lados. Bohr y de Hevesy se convirtieron en muy buenos amigos.

En 1913 Bohr comenzó a interesarse en la estructura del átomo. Al reunirse con de Hevesy pronto comprendió que las propiedades químicas del átomo estaban determinadas por los electrones alrededor del núcleo, mientras que las propiedades radioactivas estaban asociadas al núcleo atómico. Al determinar los electrones las propiedades químicas, y al depender la cantidad de electrones de la cantidad de cargas eléctricas positivas en el núcleo atómico, se encontraba aquí la relación entre la clase de átomo y las propiedades químicas.

Esa relación ya había sido demostrada en la década de 1860 por el químico ruso *Dmitrij Mendeleiev* (1834–1907) quien demostró el sistema periódico de los elementos. Descubrió que los diferentes elementos podían ordenarse en una serie según sus pesos atómicos, pero que en esa serie se encuentra una periodicidad en la existencia de elementos con propiedades químicas semejantes (por ejemplo flúor, cloro, bromo, yodo). Dividió la larga serie en pequeñas secciones que colocó una debajo de la otra de modo que los elementos con propiedades semejantes formaran columnas. De ese modo obtuvo una tabla con un casillero para cada elemento. Algunos casilleros quedaron vacíos, pero Mendeleiev pensaba que se debía a que esos elementos no habían sido descubiertos todavía. Tenía razón y su sistema ha sido de gran ayuda en la investigación de nuevos elementos.

Bohr cambió el sistema periódico: en lugar de ordenar los elementos según su peso atómico, eligió numerar los casilleros en el sistema: desde el casillero número 1 (hidrógeno) hasta el casillero número 92 (urano). ¿Quizá esos números eran iguales a la cantidad de cargas positivas en el núcleo atómico de cada elemento? Eso podría explicar las propiedades químicas periódicas semejantes.

Su amigo de Hevesy señaló que la cantidad de elementos radioactivos descubiertos (radón, radio A, radio B, radio C, etc.) era mucho mayor que la cantidad de casilleros disponibles. Pero Soddy había llegado a la conclusión de que los elementos radioactivos, con excepción del radio y el polonio, no eran elementos nuevos sino variantes de elementos existentes. No eran diferentes en lo que respecta a las propiedades químicas sino que sólo tenían diferentes pesos atómicos, es decir, tenían diferentes masas con la misma carga eléctrica en el núcleo atómico. Tenían, por lo tanto, el mismo lugar en el sistema periódico y por eso podían denominarse isótopos de un elemento.

Las ideas de Bohr recibieron el apoyo de un joven investigador de Manchester, *Henry Moseley* (1887–1915). Moseley estudió en 1913 el espectro de rayos X. La radiación que Röntgen había descubierto estaba en concordancia con las ecuaciones de Maxwell cuando un haz electrónico es frenado al encontrar materia, como en el ánodo de un tubo de rayos X. Esa radiación se denomina *radiación de frenado* y contiene un espectro continuo de diferentes frecuencias hasta una frecuencia que es la más alta y que está determinada por

la energía de los electrones incidentes, es decir, por la tensión entre el ánodo y el cátodo del tubo de rayos X. Además de esta radiación de frenado existe también otra radiación X que al igual que la radiación γ tiene frecuencias bien definidas. Se la denomina radiación característica, ya que sus frecuencias son características del elemento que forma el ánodo del tubo de rayos X. La frecuencia de la radiación característica depende del número atómico del elemento, que suele indicarse con la letra Z.

En el momento en que se realizaba la investigación de Moseley, se habían comenzado a desarrollar métodos de espectroscopía de rayos X. Esto tuvo lugar fundamentalmente bajo la conducción de *Max von Laue* (1879–1960), quien en 1912 había tenido la idea de utilizar cristales para obtener una retícula que permitiera la espectroscopía. Von Laue era profesor de física en Zurich pero se trasladó a Berlín en 1919, donde en 1951 fue nombrado jefe del Max Planck-institutet de fisicoquímica. Obtuvo el premio Nobel de física en 1914.

Moseley, que seguramente habría obtenido también el premio Nobel si la guerra no le hubiera arrancado la vida siendo tan joven, encontró una relación simple entre la frecuencia (ν) de la radiación característica y el número atómico Z. Para la radiación de frecuencia más alta descubrió que

$$\nu = R \times (3/4) \times (Z - 1)^2 \quad (9.8)$$

en donde R es la *constante de Rydberg* (ver ecuación 4.5). Moseley pudo demostrar que los diferentes elementos en el sistema periódico podían ser ordenados según las frecuencias de la radiación X característica, en el que Z mostraba claramente su orden. Fue Moseley quien acuñó el nombre *número atómico*. La carga eléctrica positiva del núcleo atómico debe entonces ser $Z \cdot e$, si e es la carga (negativa) del electrón.

Lo que Bohr hizo fue relacionar la información espectroscópica sobre la radiación electromagnética de los átomos (tanto con luz visible como ultravioleta y radiación X) con la teoría de Plank sobre energía cuántica, $h \cdot \nu$.

El resultado de Moseley referente a la radiación X estaba formalmente de acuerdo con la expresión de Sínnne Rydberg para el número de onda (ver ecuación 4.5), es decir:

$$1/\lambda = R \times (1/n^2 - 1/m^2) \quad (9.9)$$

Podemos multiplicar ambas miembros con la constante de Planck h, y reemplazar $1/\lambda$ por ν/c donde ν es la frecuencia de la radiación y c es la velocidad de la luz. El producto $h\nu$ puede interpretarse como una energía cuántica ΔE , de tal modo que

$$\Delta E = (R \cdot c \cdot h) \times (1/n^2 - 1/m^2) \quad (9.10)$$

Bohr realizó un número de suposiciones. Primero supuso que los electrones circulan como los planetas alrededor del sol-núcleo atómico. Con las leyes de la física clásica un electrón debe adquirir una aceleración centrípeta v^2/r si la velocidad del electrón es v y el radio de su órbita es r. La fuerza centrípeta sigue la ley de Coulomb, es decir, es directamente proporcional a la carga eléctrica del electrón, y a la carga eléctrica del núcleo $Z \cdot e$, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre las cargas (el radio r). La constante de proporcionalidad es $1/4\pi\epsilon_0$. Puesto que la fuerza también puede ser calculada como masa multiplicada por la aceleración, podemos plantear una ecuación entre dos maneras de indicar la fuerza. Si la masa

del electrón se representa como m , obtenemos

$$m \cdot v^2 / r = Z \cdot e^2 / 4 \pi \epsilon_0 r^2 \quad (9.11)$$

De allí se puede calcular el radio r de la órbita del electrón alrededor del núcleo atómico. Con la hipótesis de la física clásica todos los radios de órbitas serían posibles, y el electrón perdería rápidamente energía y decrecería el radio de su órbita mediante la emisión de radiación electromagnética. Bohr dejó por ello de lado la física clásica y tuvo en cuenta las condiciones cuánticas de Planck. Él postuló que solo están permitidos los radios de las órbitas en que el impulsomoment (momento angular) del electrón $m \cdot v \cdot r$ es un múltiplo entero de $h/2\pi$. Al entero (n) se lo denomina número cuántico principal del electrón. Las condiciones de Bohr pueden escribirse así

$$m \cdot v \cdot r = n \cdot h / 2\pi \quad n = 1, 2, 3... \quad (9.12)$$

Se trataba de una conjetura de Bohr. Se pueden realizar comparaciones con una ondulación en una cuerda tensa, por ejemplo, con una longitud $2\pi r$. Existe solo cierto número de cuerdas que tienen la longitud correcta para una vibración con una frecuencia dada. No existía todavía una teoría ondulatoria de las partículas tales como los electrones, pero el duque francés Louis de Broglie (1892–1987) demostró en 1924 que se puede atribuir a una partícula material propiedades ondulatorias, lo cual facilitaba comprender la hipótesis de Bohr.

Con la hipótesis de Bohr se podía calcular a un valor dado del número cuántico principal n el radio del electrón permitido mediante la combinación de las expresiones (9.11) y (9.12). Luego es posible calcular la energía total del electrón como el resultado de su energía cinética $\frac{1}{2} m v^2$ y su energía potencial. Esta última puede calcularse con ayuda de la ley de Coulomb ^[15] $<#_ftn1>$].

Se considera entonces que la energía total en una órbita de un electrón equivalente al número cuántico principal n será

$$E_n = - \frac{m e^4 Z^2}{8 \epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2} \quad (9.13)$$

Bohr supuso luego que los electrones, a pesar de su movimiento alrededor del núcleo atómico, no perdían energía a través de la radiación electromagnética. Esa energía se daba solo si el electrón saltaba de una órbita a otra ⁽¹⁶⁾, razonaba Bohr. La radiación emitiría un cuántum de energía ΔE igual a la diferencia de energía entre dos órbitas de electrón, es decir

$$\Delta E = \frac{m e^4 Z^2}{8 \epsilon_0^2 h^2} \cdot \left(\frac{1}{n_2^2} - \frac{1}{n_1^2} \right) \quad (9.14)$$

Si comparamos esta expresión con (9.10) encontramos que las expresiones son idénticas si la constante de Rydberg puede ser expresada como

(15)Nota del Revisor: La energía potencial resulta ser: $-Z e^2 / 4 \pi \epsilon_0 r$

(16) Nota del Revisor: La pérdida de energía se da cuando el electrón pasa a una órbita más cercana al núcleo

$$R = m \cdot e^4 / 8\epsilon_0^2 h^3 c \quad (9.15)$$

Puesto que el valor de la constante de Rydberg también podía ser calculado sobre la base de las mediciones espectroscópicas, las suposiciones de Bohr podían confirmarse. Aquí existía ahora *un modelo atómico de Bohr*, basado sobre las hipótesis que se oponían a la física clásica y que eran bastante arbitrarias, pero que demostraron describir muy bien la realidad. Se había revelado la estructura del átomo, pero faltaba revelar qué secretos guardaba el núcleo atómico. El núcleo donde dormía tanta energía.

Por supuesto que faltaba mucho para pulir el modelo. Los diferentes estados con los números cuánticos principales $n = 1, 2, 3, 4 \dots$ suelen representarse con las letras K, L, M, N ... Sin embargo el estado de movimiento del electrón no se determinaba solamente por el número cuántico principal (n) sino también por un número cuántico secundario (l), un número cuántico magnético (m) y un número cuántico de spin (s). El *principio de Pauli*, llamado así por su creador, *Wolfgang Pauli* (1900–1958), no permite que se encuentre más de un electrón en cada estado cuántico. La cantidad de electrones permitidos en el nivel K ($n=1$) será entonces 2 para $l = 0$, en el nivel L ($n=2$) será 2 para $l = 0$ más 6 para $l = 1$, en el nivel M ($n=3$) será 2 para $l = 0$, más 6 para $l = 1$ más 10 para $l = 2$, como consecuencia de las posibilidades que ofrecen los números cuánticos.

Cuando los niveles (determinados fundamentalmente por el número cuántico principal pero también por el número cuántico secundario) están “saturados” de electrones, el átomo es químicamente inerte, como en el caso del helio, por ejemplo ($Z=2$ y por lo tanto 2 electrones) y el neón ($Z=10$ y por lo tanto 10 electrones). En el caso del neón, los niveles K y L están saturados con 2 y 2 + 6 electrones respectivamente.

Entre los que continuaron revelando las órbitas del electrón con ayuda de la espectroscopía estuvieron nuestro ganador del premio Nobel, el sueco *Manne Siegbahn* (1886–1978), quien trabajó con Síne Rydberg en la universidad de Lund desde 1908 a 1923, profesor de física en Uppsala entre 1923 y 1937 y jefe del Instituto de Investigaciones de la Academia de ciencias en Frescati, en las afueras de Estocolmo de 1937 a 1964. Siegbahn obtuvo el premio Nobel de física en 1924 por sus descubrimientos espectroscópicos relacionados con los rayos X.

10 | La infancia de la radiología

Los grandes descubrimientos relacionados con la radiación, la radioactividad y la estructura del átomo se realizaron en un pequeño número de ciudades durante la década posterior a las observaciones de Röntgen en Würzburg: París, Cambridge, Zurich, Montreal, Manchester... Pero al mismo tiempo tuvo lugar un rápido desarrollo del uso de las nuevas fuentes de radiación, principalmente para uso medicinal. Había nacido la radiología médica y crecería con rapidez.

Este desarrollo temprano comprendió aportes pioneros de numerosos países. Todo lo que escribo es una descripción desde el punto de vista sueco. Por razones comprensibles conozco mejor lo que ha tenido lugar en Suecia que en la Argentina, Australia, Azerbaiyán, Bélgica, Brasil, Canadá, Cuba, Dinamarca, Egipto, Inglaterra, Estonia, Finlandia, Francia, Georgia, Grecia, India, Irlanda, Islandia, Italia, Japón, Java, China, Letonia, Malaya, México, Holanda, Noruega, Palestina, Polonia, Puerto Rico, Portugal, Rumania, Rusia, Suiza, Escocia, España, Sudáfrica, Checoslovaquia, Túnez, Alemania, Hungría, Uruguay, Estados Unidos, Austria, que son los países o regiones que, además de Suecia, estuvieron representados en el II Congreso Internacional de Radiología en Estocolmo en 1928.

Por supuesto que durante los pasados treinta años ha habido una importante estructura de radiología en cada una de esas regiones, una estructura que lamentablemente no he podido estudiar. Lo que puedo contar es tan solo una pequeña fracción de lo que ha tenido lugar en este campo.

Ya se han mencionado un número de aportes pioneros realizados después del descubrimiento de Röntgen, en particular las actividades de Stenbeck y Sjögren en Estocolmo. Las primeras fotografías röntgen fueron llamadas *esquiagramas* (del griego *skiagraphia*, una imagen en luz y sombras), y el primer esquiagrama del mundo fue una imagen que Röntgen tomó de la mano de su esposa. La siguiente fotografía röntgen de una parte del cuerpo fue tomada probablemente por el ingeniero escocés A.A. Campbell-Swinton el 13 de enero de 1896. Fue exhibida en el The Camera Club de Londres el 16 de enero y se conserva hoy en The Science Museum de Londres. El primer esquiagrama publicado, también de una mano, fue fotografiado el 17 de enero, e impreso en el *New York Medical Record*.

Sin embargo esos esquiagramas eran curiosos. Más seria fue la fotografía médica röntgen exhibida por *Toussaint Barthélemy* (1852—1906) y *Paul Oudin* (1851—1923), cuando Henri Poincaré el 20 de enero de 1896 informó sobre el descubrimiento de Röntgen ante la Academia de Ciencias francesa.

Otra noticia digna de mencionar es que Thor Stenbeck utilizaba ya en 1896 películas intraorales para radiografías dentales, es decir, pequeñas películas radiográficas que se colocaban en la boca del paciente detrás de los dientes que serían radiografiados. En la década de 1940 el odontólogo sostuvo firmemente la película en la posición correcta e irradió una y otra vez los mismos dedos, lo cual le provocó daños por radiación. En la actualidad nadie debe sostener la película, pero si alguien debe hacer algo, debe ser el paciente y no el odontólogo. El número de radiaciones en los dedos no será tan alto como para que signifique un riesgo.

La siguiente noticia curiosa está relacionada con el Dr. *John MacIntyre* de Glasgow, quien en 1897 intentó tomar radiografías móviles. Él tomaba una imagen por vez de una rana y cambiaba la posición del batracio entre cada imagen. La serie completa fue luego copiada en una película. Al exhibirla daba la sensación de movimiento.

Pero no todas las cosas eran curiosas. Muchas imágenes röntgen excelentes al servicio de la medicina fueron tomadas en Estocolmo durante 1897-1898, y están reproducidas en el popular y sorprendente libro de Thor Stenbeck, *Röntgenstrålarne i medicinens tjänst* (Los rayos röntgen al servicio de la medicina), editado en 1900.

Ya el matrimonio Curie se había dado cuenta de los efectos biológicos de la radiación, mientras que Röntgen tenía tanto temor a las interferencias en sus instrumentos que blindó la radiación con una pantalla, evitando así lesiones. El primero en investigar sistemáticamente el efecto de la radiación radiográfica sobre la piel fue el radiólogo austriaco *Leopold Freund* (1868–1943) en Viena. Se puede afirmar que estableció las bases del tratamiento radiológico medicinal.

El 12 de diciembre de 1896 se publicó en la revista estadounidense *Western Electrician* un artículo escrito por un hombre llamado *Wolfram Fuchs*. Él consideraba que las lesiones cutáneas de la radiación provocaban dolor pasajero (ya había padecido ese dolor en cuatro oportunidades) y afirmaba que “la lesión era insignificante si se la compara con los beneficios que brinda este maravilloso descubrimiento”. Sin embargo se podían reducir los riesgos de lesiones cutáneas siguiendo algunas recomendaciones sencillas indicadas por Fuchs:

- (1) *La exposición debe ser lo más breve posible.*
- (2) *No coloque el tubo a una distancia del cuerpo menor a 12 pulgadas (30 cm).*
- (3) *Frote bien la piel con vaselina y deje una capa en la parte que va a ser expuesta.*

¡Era el año 1896! Las primeras dos reglas todavía están entre las más importantes recomendaciones de protección contra la radiación. Fuchs pudo haber agregado que se debía blindar el haz de radiación para evitar que una gran superficie sea innecesariamente irradiada, y que el tubo debiera contar con un filtro de metal para que la radiación más suave (que no tiene valor radiográfico alguno pero que es dañina para la piel) fuera eliminada. Fuchs había mencionado lo más importante.

Pero continuó:

Las “quemaduras” röntgen no son más peligrosas que las quemaduras comunes. [...] cuando los rayos röntgen impactan en el cráneo durante cierto tiempo, el pelo se cae pero vuelve a crecer sin efectos desagradables.

Fuchs era un optimista. Sería interesante saber cómo le fue.

En 1897 se creó la británica Röntgen Society en el número 11 de la calle Chandos Street de Londres, con Wilhelm Conrad Röntgen como miembro de honor. El presidente de la sociedad fue *Silvanus P. Thompson* (1851–1916), profesor de física aplicada y director del Technical College de Londres. Thompson había estado cerca de descubrir la radioactividad antes que Becquerel. Había colocado sal de uranio en una placa fotográfica protegida. Luego encontró que la placa se había ennegrecido en el centro de la parte posterior de la placa sobre la cual estaba la sal. Le comunicó la novedad al presidente de la Royal Society, quien el 29 de febrero de 1896 le respondió que Thompson debería publicar sus observaciones sin demora. Pero el 24 de febrero Becquerel publicó su descubrimiento. Por eso hoy hablamos de “becquerel” (Bq) en lugar de “thompson” (o, lo que es más probable, “rutherford”).

Entre los miembros del directorio de la sociedad británica Röntgen estaban, entre otros, el “hombre rana” MacIntyre y el ingeniero Swinton.

En 1897 entran en escena los grandes radiólogos, el francés *Antoine Bécélère* (1856–1939) y el alemán *Heinrich Albers-Schönberg* (1865–1921), los cuales iban a dominar la radiología europea durante dos décadas. Las viejas fotografías muestran a Bécélère con grandes bigotes negros y barba entera, que recordaban a Röntgen. Las fotografías posteriores — Bécélère llegó a vivir 83 años — muestran a un hombre pequeño, elegante con barba blanca.

Albers-Schönberg no vivió tanto: Murió de cáncer a los 56 años, probablemente como consecuencia de daños por la radiación. Quizá tenía deseos de experimentación más técnica. En las fotografías nos recuerda a Sven Hedin, con un bigote muy bien cuidado. En la enciclopedia sueca *Svensk Uppslagsbok* hay un artículo acerca de él, que en su parte final dice: “Fue el gran líder central de la radiología durante su primera etapa de desarrollo y reunió alrededor suyo a un círculo de médicos, físicos y asistentes técnicos (“la escuela de hamburguesas”). Su inteligencia, su capacidad y su adorable personalidad le crearon una gran reputación en todos los ámbitos.” En la misma edición no hay ni una mención acerca de Bécère, lo cual demuestra cuán grande fue la influencia alemana durante gran parte de la década de 1940.

Bécère, que suele llamarse “el padre de la radiología francesa”, ingresó en 1897 como jefe de la clínica médica del hospital Tenon de París. Allí consiguió de inmediato un aparato radiográfico para radioscopías, es decir, un dispositivo en el que el médico observaba en una pantalla fluorescente frente al paciente en lugar de que la imagen apareciera en una placa fotográfica (“radiografía”). Al año siguiente llevó consigo el aparato al hospital Saint Antoine, donde en 1900 estableció un laboratorio radiográfico con un radiólogo como jefe.

Siendo jefe de la clínica médica, Bécère publicó en octubre de 1899 un artículo denominado “Radioscopia y radiografía en los hospitales”. Allí expuso la idea de que el uso médico de la radiación X comprendía fundamentalmente la radioscopia y no la radiografía, que parecía dominar a todas las publicaciones con reproducciones de imágenes. La radioscopia debería ser manipulada por estudiantes de medicina, en lugar de radiólogos, afirmaba Bécère. Son los estudiantes de medicina los que pueden hacer preguntas, estudiar, palpar, golpear y escuchar y son los que conocen la enfermedad, agregaba Bécère. Además la radioscopia era más barata que la radiografía. Su conclusión era que “es necesario que todos los hospitales estén equipados con una sala de exámenes para radioscopia”.

Aquí está la explicación original de los datos inesperados acerca del diagnóstico radiográfico francés que recibí 58 años después, cuando por encargo de la ONU debía escribir un informe sobre las dosis de radiación en pacientes. En Francia la radioscopia había alcanzado niveles sorprendentes. La radioscopia era, al principio, peligrosa para el médico, fundamentalmente si éste no tenía los conocimientos que debería tener un radiólogo. Era fácil colocar partes del cuerpo en la radiación primaria y también la secundaria era más intensiva cerca del paciente.

En 1897 *Albers-Schönberg*, ginecólogo en sus orígenes, abrió un instituto radiológico en Hamburgo junto con su colega *G. Deycke* (1845–1940), un médico especialista en tuberculosis pulmonar. *Albers-Schönberg* y *Deycke* fundaron el mismo año la reputada publicación *Fortschritte auf dem Gebiete der Röntgenstrahlen*. „Fortschritte“ fue la publicación radiológica más antigua de cierta importancia.⁽¹⁾

Al año siguiente se creó la “Sociedad Röntgen de Berlín”. Esta sociedad organizó un gran congreso radiológico en Berlín en 1905. Después del congreso, el 2 de mayo, se decidió crear una Sociedad Röntgen alemana que tendría un papel importante, la *Deutsche Röntgen Gesellschaft*.

El 1 de marzo de 1898, en un encuentro de la Sociedad Röntgen británica, uno de sus miembros, *Ernest Payne*, propuso que la sociedad debería crear una comisión especial que estudiara el problema de las lesiones cutáneas causadas por la radiación radiográfica. Se formó la comisión y la integraron el presidente, el secretario y tres miembros de la Sociedad Röntgen, entre ellos Payne, designado como secretario de la misma. La comisión envió un formulario con preguntas a los usuarios de aparatos radiográficos. Se consultaron los siguientes datos:

(1) Entre otras publicaciones alemanas importantes cabe mencionar *Strahlentherapie* en junio 1912 con el profesor *Hans Meyer* (1877–1964) como redactor principal (hasta 1965, fecha en que fue reemplazado por el radiólogo *J. Becker* de Heidelberg), y *Zentralblatt für die Gesamte Radiologie* en Berlín en 1926.

A. Datos médicos

1. Clase de efectos adversos.
2. Descripción del propósito de la radiación.
3. Partes del cuerpo expuestas.
4. Estado del paciente:
 - (a) Bien alimentado o demacrado.
 - (b) Nervioso o flemático.
 - (c) Estado general del paciente
 - (d) Estado de la parte del cuerpo irradiada
5. ¿Se quejó el paciente del calor, irritación, etc. durante o después de la exposición?
6. Duración de los efectos, temporarios o permanentes Observaciones.

B. Datos eléctricos

7. Aparato utilizado, máquina de electricidad por influencia o bobina de inducción, longitud de la chispa, tensión y número de amperes.
8. Forma del tubo, distancia entre los extremos.
9. Distancia del tubo desde el cuerpo del paciente.
10. Cantidad de exposiciones, intervalo entre las exposiciones si fueron varias, duración de cada exposición.
11. Posición del tubo con relación al cuerpo o parte del cuerpo, es decir, posición del ánodo y el cátodo.
12. ¿Qué cobertura se utilizó, si es que la hubo?:
 - (a) Material.
 - (b) Gruesa o tersa.
 - (c) Color, si el material estaba coloreado.
13. Observaciones.

No he visto ningún informe sobre las respuestas a esas preguntas pero existen seguramente en el archivo de la sociedad, ya que un editorial en la publicación *British Journal of Radiology* de noviembre de 1953 describe las respuestas como confusas y agregaba: “ya sea por apatía, ya sea por desconocimiento entre los trabajadores encargados de las radiografías, los daños y las muertes continuaron”.

Paralelamente con el desarrollo del diagnóstico röntgen, se hizo un intento de utilizar los rayos X y la radiación del radio con propósitos terapéuticos. Los primeros intentos de tratamiento de cáncer con radiación X parecen haber sido realizados por un fabricante estadounidense de tubos de descarga, *Emil Herman Grubbé*, el 29 de enero de 1896 después que él mismo presentara eritema cutáneo por la radiación. Estos intentos fracasaron. Al día siguiente Grubbé intentó tratar una tuberculosis cutánea con radiación X.

En Suecia se lograron mejores resultados en 1899. Fue el año en que Thor Stenbeck realizó el primer tratamiento exitoso con radioterapia de un tumor maligno, un cáncer de piel microscópico verificado en la nariz de una mujer de 49 años. El tratamiento comenzó el 4 de junio de 1899 y comprendió un total de 99 sesiones. Gösta Forssell, que en esa época era asistente de Stenbeck, pudo mostrar 25 años después al paciente sin dolores en una reunión de la Asociación Sueca para la radiología médica.

Sin embargo Stenbeck no fue el primero en publicar un tratamiento de radioterapia exitoso. Tage Sjögren realizó su primera radioterapia de cáncer de piel más tarde pero fue más veloz en

publicarlo. Había tratado a un hombre mayor, de barba blanca, que tenía cáncer de piel en su mejilla izquierda, debajo del ojo. Sjögren se quejaba de que era difícil establecer cuánta radiación debía irradiar, y debía trabajar “según su impresión”.

La mala capacidad de penetración de la radiación que tenían los aparatos de entonces hizo que los daños por radiación limitaran el uso a dolencias superficiales. El uso de radio como fuente de radiación para la radioterapia parecía más prometedor debido a la mayor capacidad de penetración de la radiación gamma y a que los pequeños contenedores con radio podían introducirse en las cavidades del cuerpo.

Hubo un tercer pionero de la röntgenología en Suecia, el Dr. *Ivar Bagge*. Él trabajaba en Gotemburgo y obtuvo su primer aparato röntgen en el verano de 1899. Es importante mencionar las dificultades que debían superar los primeros radiólogos: Bagge no podía obtener ayuda técnica en Gotemburgo: era el único que tenía un tubo röntgen en toda la costa oeste de Suecia. Su nuevo tubo funcionaba bien al principio pero pronto comenzó a presentar problemas. Bagge se vio obligado a viajar a Berlín con su tubo röntgen para asesorarse con el proveedor.

Quizá sea oportuno mencionar algunas cuestiones acerca de los viejos tubos röntgen. El siguiente relato lo obtuve de un trabajo de Sven Benner incluido en el Anuario 1969 de la Sociedad de Historia de la Medicina del Sur de Suecia.

Benner comienza haciendo referencia a los extensos estudios de las descargas eléctrica en gases enrarecidos antes del descubrimiento de Röntgen y menciona el *tubo geissler*, en el cual se podían estudiar bellísimos fenómenos lumínicos con colores cambiantes generados por el tipo de gas, la presión del mismo y las condiciones eléctricas. La palabra “tubo”, al igual que la posterior “tubo röntgen”, no debe ser tomada literalmente, ya que la forma podía variar mucho.

Cuando Crookes descubrió los rayos catódicos no se sabía todavía que estaban compuestos por electrones, pero podían ser observados con baja presión de gas (algunas milésimas de milímetro de columna de mercurio). Los rayos catódicos salían del electrodo negativo del tubo de descarga y generaban una fluorescencia en la pared de vidrio del tubo en el extremo opuesto. Herz y Lenard habían demostrado que era posible sacar los rayos catódicos fuera del tubo si se lo proveía de una pared extra delgada, por ejemplo, un orificio cubierto con una lámina de aluminio en el lugar en que chocaban los rayos catódicos. Röntgen demostró con su descubrimiento en 1895 que la pared de vidrio o metal interpuesta en el camino de los rayos catódicos emite radiación (“radiación de frenado”) cuando los rayos catódicos, es decir los electrones, son frenados en el material.

Cuando se siguió experimentando y los rayos X se generaron en un trozo de metal dentro del tubo de descarga (en el camino de los rayos catódicos hacia el ánodo en el otro extremo del tubo), se denominó a este trozo de metal “anticátodo” y se acoplaba eléctricamente al electrodo positivo, el ánodo. Con el tiempo se suprimió el ánodo original y pasó a llamarse ánodo al “anticátodo”.

Antes de 1913 todos los tubos röntgen eran “tubos de cátodo frío”, es decir, el cátodo no se calentaba. Estaba compuesto por una placa de aluminio que era impactada por iones positivos de gas cuando se disminuía la presión del gas y se aplicaba una corriente eléctrica entre el ánodo y el cátodo. El bombardeo de iones emitía electrones que podían moverse fácilmente hacia el ánodo y allí, en el frenado dentro del ánodo de metal, generaban radiación X. La elección del aluminio como metal del cátodo se debía a que se había establecido que ese metal soportaba mejor el bombardeo de iones positivos.

Sin embargo, el problema con el tubo de cátodo frío era mantener una presión de gas baja adecuada en el tubo röntgen. Si la presión aumentaba, por ejemplo, cuando se sobrecalentaba

el ánodo por el bombardeo de electrones, aumentaba la corriente de electrones fuertemente, lo cual provocaba que la tensión requerida disminuyera. Se decía entonces que el tubo estaba “blando” y emitía radiación “blanda”, es decir, radiación X de poca penetración que no podía generar buenas radiografías. Sin embargo era más común que la presión bajara mediante la extracción debido al agotamiento del gas. En ese caso disminuía la corriente de electrones al mismo tiempo que aumentaba la tensión requerida. Se decía entonces que el tubo estaba “duro”. Con los tubos “duros” la radiación X fue más penetrante, pero su densidad⁽²⁾ fue más baja y por ello eran necesarios períodos de exposición más largos.

Los tubos demasiado blandos debían ser desechados. Los tubos duros podían salvarse mediante el suministro de gas con la ayuda de “dispositivos de regeneración” más o menos ingeniosos.

Los principales fabricantes de equipos que se podían utilizar en radiología tenían experiencia en aparatos electromedicinales antes del descubrimiento de Röntgen. En Alemania la empresa Siemens & Halske vendía equipos röntgen ya en 1896, al igual que la firma Reiniger, Gebbert & Schall, de Erlangen, conducida por *Max Gebbert* (1856–1907). Ambas firmas se unieron más tarde en lo que luego se llamaría Siemens-Reiniger-Werke A.G., a pesar de que *Erwin Reiniger* (1854–1909) había dejado la firma ya en 1895.

En Hamburgo *Carl Heinrich Müller* (1845–1912) tenía desde 1865 un taller de soplado de vidrio que vendía los tubos de descarga de Crooke y Geissler desde 1874 y luego tubos röntgen, en colaboración con la firma de instrumentos Richard Seifert & Co., que fabricaba bobinas de alta tensión. La firma de Müller fue comprada después de cierto tiempo por el grupo holandés Philips.

En Nueva York una empresa constituida por el padre y su hijo, *Ernst y Robert Machlett*, creaba una empresa de soplado de vidrio en 1897. Dos años después cambiarían la razón social por E. Machlett & Son. En el verano de 1897 se fabricaba el primer tubo röntgen para su comercialización en los Estados Unidos, bajo la conducción de Robert Machlett (1872–1926). Cuando Robert Machlett murió en 1926, se interrumpió la producción y la empresa fabricó en su lugar artículos de vidrio para laboratorio. El hijo de Robert, *Raymond Machlett* (1900–1955), que había tenido litigios de patentes dentro de su propia empresa Rainbow Light Company, fue convencido para reiniciar la producción de tubos röntgen en 1931 y lo hizo desde una nueva empresa, Machlett Laboratories. La actividad fue exitosa y Machlett pudo mudarse en 1934 de Nueva York a Springdale, Connecticut. Los tubos röntgen de Machlett adquirieron fama con el tiempo hasta la II Guerra Mundial, cuando Machlett, en nombre de Westinghouse, comenzó a fabricar tubos de radio y radares, su nueva act

Se dio un gran paso adelante cuando la emisión de electrones desde el cátodo se pudo regular mediante el calentamiento del cátodo. Ya en la década de 1880 Edison había demostrado que una corriente eléctrica podía atravesar el vacío de una lámpara incandescente si se añadía un electrodo extra. Edison había iniciado la fabricación de lámparas incandescentes en 1878. Esa fábrica se fusionó luego con algunas otras que luego se convertirían en el gigante industrial General Electric Co., empresa que pronto se interesó en los equipos de radiografía.

El físico británico *Owen Richardson* (1879–1959) estudió en 1903 la relación entre la emisión de electrones de cuerpos calientes y su temperatura. El paso final se dio en 1913 en los laboratorios de investigación de General Electric en Schenectady, cuando el futuro premio Nobel *Irwin Langmuir* (1881–1957) estudió en profundidad la emisión de electrones de cátodos calientes, investigó las descargas eléctricas en gases y estableció las bases de la física plas-

(2) Nota del Revisor: Más exactamente, “intensidad”

mática. Esto permitió que *William Coolidge* (1873—1975), quien luego sería jefe de los laboratorios de General Electric, construyera en 1913 el primer tubo röntgen con cátodo caliente, *el tubo coolidge*. No se debe sobreestimar su importancia. Por primera vez no se dependía de la presión de gas en el tubo röntgen.

El tubo coolidge trabajaba con presión mucho más baja que la de los tubos duros de cátodos fríos y las variaciones en baja presión carecían de importancia. El cátodo en el tubo coolidge estaba compuesto por un filamento de tungsteno que libera electrones al calentarse. Uno de los grandes aportes de Coolidge fue lograr encontrar los métodos para trabajar el tungsteno frágil.

En el tubo röntgen de cátodo caliente se controlaba la corriente de electrones a tensiones suficientemente altas, solamente por la temperatura del cátodo caliente, la cual podía ajustarse con ayuda de la corriente eléctrica a través del filamento.

La alta tensión aplicada a un tubo de rayos X, y la “dureza” de la radiación que provocaba, eran independientes de la corriente a través del tubo. Si se tenía acceso a una fuente de alta tensión estable se podía ajustar la corriente y la tensión, una independiente de la otra y además mantenerlas constantes, lo que constituía un avance enorme.

El material y diseño del ánodo fueron objeto de muchos estudios. El flujo electrónico I (ampere) que ha sido acelerado por la alta tensión V (voltios) aplicada a un tubo suministra al ánodo una energía cinética por unidad de tiempo (es decir, potencia) de $V \cdot I$ watt. Una fracción de esta potencia se convierte en radiación X (radiación de frenado) cuando los electrones son frenados en el ánodo. Esta fracción de la potencia, asociada a la radiación X puede ser de aproximadamente $10^{-9} Z \cdot V$.⁽³⁾ Cuanto más alto es el número atómico del ánodo (Z), más grande es el rendimiento. Aún a 100 kV y $Z = 100$ (en la práctica no existe un número atómico tan alto) el rendimiento será de solo el 1%. Casi toda la energía cinética que la corriente del tubo transfiere al ánodo del tubo de rayos X se convierte en calor. El ánodo debe por ello ser un metal con un número atómico y un punto de fusión altos. Es por ello que desde un primer momento se eligió el platino ($Z = 78$, punto de fusión 1174°C). Para poder crear imágenes de rayos X, se requiere que la parte del ánodo (foco) que emite la radiación X sea pequeño. Esto significa que una potencia grande se suministra a un volumen pequeño, lo cual puede exigir una buena capacidad termoconductora del ánodo de metal, de tal modo que el calor suministrado se pueda disipar rápidamente. Pero al disiparse el calor se podían presentar problemas por el calor excesivo. Una solución frecuente era emplear una delgada capa de wolframio ($Z = 74$, punto de fusión 3370°C), que soporta altas temperaturas, en una barra de cobre que, gracias a la buena capacidad termoconductora, distribuye el calor sobre un volumen más grande. Otras medidas pueden ser la refrigeración con ayuda de un líquido refrigerante (con frecuencia el aceite, que no es conductor eléctrico) o una fuerte corriente de aire mediante cavidades en el ánodo.

Si el ánodo está tan caliente que la pérdida de calor tiene lugar principalmente a través de la radiación, la pared de vidrio del tubo de rayos X puede calentarse demasiado. Una manera de evitarlo era aumentando la distancia del vidrio al ánodo, lo que podía darle al tubo una forma similar al de una esfera.

Otro modo de minimizar el riesgo de recalentamiento era disminuir la exigencia de rendimiento gracias al aumento de la sensibilidad de los medios que registraban las imágenes, por ejemplo, con la ayuda de una película de rayos X más sensible (introducida por Kodak en 1918) o pantallas reforzadoras radiográficas para mejorar la sensibilidad. Antes que esta película estuviera disponible, muchos radiólogos colocaban dos placas de rayos X con

(3) Esto significa que la energía röntgen y la potencia röntgen que se generan son proporcionales a V^2 , es decir al cuadrado de la tensión del tubo.

emulsiones, una contra la otra, pudiendo generar así el mismo ennegrecimiento con menor radiación (“Método de Köhler”).

El desarrollo de las pantallas reforzadoras ha sido penoso. En sus comienzos, sobre ambos lados de la película de rayos X se colocaban chapas de cartón cubiertas con alguna sustancia fluorescente (habitualmente wolframato de calcio) para irradiar la película no solo con la radiación X sino también con luz fluorescente desde las pantallas. Pero el tamaño del grano de las pantallas reforzadoras era demasiado grueso y la duración de persistencia demasiado extensa. Por ello *Albers-Schönberg* escribió en 1905 que las pantallas reforzadoras ya no tenían otro interés que no fuera el histórico.

En 1912 *Herbert Threlkeld-Edwards* (1870—1922) fabricó en los EE.UU. pantallas de wolframato de calcio con mejores características. La llamó “pantalla T-E” y anunció que había sido fabricada por un “röntgenólogo” para “röntgenólogos”. Tras la muerte de Threlkeld-Edward su empresa fue conducida por *Carl Patterson*, quien en 1914 había fabricado una pantalla mejor con wolframato de cadmio y que en 1916 logró producir una pantalla de grano muy fino. Las pantallas “Patterson Cleanable Intensifying Screens” fueron anunciadas como un producto sin grano y libres de persistencia. Patterson vendió su producto a Du Pont en 1943.

Las primitivas instalaciones para rayos X obtenían la corriente eléctrica de alta tensión de máquinas electrostáticas de electricidad por influencia. En general se utilizaban aparatos de inducción compuestos por un transformador de alta tensión con un núcleo abierto de hierro. El arrollamiento primario estaba compuesto por algunas vueltas de alambre de cobre grueso alimentado con corriente continua, que en los comienzos provenía de una batería de acumuladores. La corriente se cortaba y cerraba mediante un interruptor del mismo tipo que el de los timbres sencillos. Por fuera del arrollamiento primario había un arrollamiento secundario compuesto por un gran número de espiras de alambre delgado. Al cerrar el interruptor la corriente primaria en uno de esos dispositivos crece lentamente hasta un máximo, debido a la autoinducción. En ese momento se induce en el arrollamiento secundario una tensión de choque prolongada y moderadamente alta. Cuando la intensidad primaria se corta, se produce una tensión de choque alta, de corta duración y de polaridad opuesta en el arrollamiento secundario.

Un ejemplo de aparato de inducción de este tipo es la anteriormente mencionada “Bobina de Ruhmkorff”. El arrollamiento secundario se conectaba al tubo de rayos X de tal modo que el ánodo recibía tensión positiva en el pulso de corte alto, pero tensión negativa en el pulso de corte más bajo. Este último era, con frecuencia, demasiado bajo para que el tubo de cátodo frío generara una descarga dañina en la dirección incorrecta, pero para evitarlo se conectaba a menudo una válvula, en serie con el tubo de rayos X. La válvula era un tubo de descarga de gas que dejaba pasar con facilidad la corriente en la dirección deseada.

A medida que se desarrolló la tecnología, se reemplazaron los interruptores sencillos por dispositivos de interrupción más veloces, obteniendo así más pulsos de tensión por segundo. Muchos de esos dispositivos, por ejemplo los interruptores de mercurio y los interruptores electrolíticos *Wehnel*, eran complicados y causaban inconvenientes.

Recibir la tensión de un transformador común de corriente alterna sin interruptor era algo seductor: el transformador podía ser alimentado directamente de la red de corriente eléctrica alterna. Sin embargo no era posible con los viejos tubos de cátodo frío. Pero podía funcionar con un tubo de cátodo caliente, bajo la condición de que el ánodo no estuviera tan caliente que generara la emisión de electrones que destruirían al tubo de rayos X. Los aparatos dentales de rayos X son un ejemplo de cómo era posible conectar directamente el tubo de rayos X a un transformador de alta tensión con onda de corriente alterna simétrica. Así funcionaba el tubo de rayos X como su propia válvula.

Otro paso más hacia el equipo moderno de rayos X se tomó cuando se comenzaron a utilizar tubos de cátodo caliente con baja tensión y ánodo fresco, impidiendo de manera efectiva las descargas de corriente en la dirección incorrecta, dejando atrás la infancia de la radiología.

La baja tensión promedio del tubo de rayos X hizo que la radiación estuviera compuesta por fotones, algunos de los cuales tenían energías innecesariamente baja. Esta radiación “de onda larga” o “blanda” tenía mala capacidad de penetración y necesitaba ser eliminada por filtración. La radiación X blanda aparecía también en un cuerpo irradiado cuando la radiación primaria se extendía por los tejidos corporales. La radiación propagada no tenía la misma dirección que la radiación primaria y por ello no llevaba consigo información que pudiera utilizarse para una imagen de rayos X: generaba un ennegrecimiento general, molesto, de la película de rayos X.

Los primeros intentos por disminuir esta radiación molesta se basaron en la limitación del haz luminoso primario, de forma tal que una parte innecesariamente grande del cuerpo irradiado no generara radiación secundaria. Esa limitación fue utilizada por primera vez por Albers-Schönberg. Una solución radical al problema fue propuesta en Alemania en 1909 por *Gustav Bucky* (1880–1963). Bucky experimentaba con diafragmas con rejillas tridimensionales, similares a los panales en una colmena. Solo la radiación con la dirección correcta podía pasar libremente a través de la rejilla. Bucky patentó su invento en 1913.

El diafragma secundario de Bucky tenía el inconveniente de que la rejilla se reproducía en la película de rayos X, algo sumamente molesto. Por esa razón el diafragma nunca ganó adeptos. El estadounidense *Hollis Potter* (1880–1964) desarrolló por ello entre 1915–1917 un diafragma en el que la rejilla se movía para que no se reflejara en la película. Esta posibilidad había sido mencionada en la patente de Bucky, pero nunca la había utilizado. Al mismo tiempo *E.W. Caldwell* (1870–1918) realizaba experimentos semejantes, pero murió al poco tiempo sin lograr ningún avance en la práctica.

El primer modelo comercial disponible con diafragma móvil, llamado “Diafragma Bucky–Potter”, apareció en 1920, y cuando Kodak confirmó la efectividad del diafragma en 1922, comenzó a ser utilizado por todos. Bucky debería llevarse la gloria por el invento, pero fue Potter el que logró darle un uso práctico. Bucky había realizado otros inventos, como por ejemplo un dispositivo para el ajuste automático del diafragma de las cámaras con la ayuda de una célula fotoeléctrica. Por ese invento obtuvo la patente en los EE.UU. junto con Albert Einstein (!). (según Mould, ver referencia). Bucky también hizo un aporte en otra área: En su libro *Grenzstrahl-Therapie* (1928) describió en profundidad una técnica para el tratamiento de dolencias cutáneas con radiación X muy blanda, que solo podía salir del tubo de rayos X mediante una ventana que podía ser penetrada con facilidad. A la radiación X blanda la denominó Grenzstrahlen o rayos Grenz (límite), ya que el espectro de la radiación electromagnética se encontraba en el límite entre la radiación X y la luz ultravioleta. También se la conoce como “Radiación Bucky”. Los rayos Grenz tenían una longitud de onda de aproximadamente 2 Å, y los tubos de rayos X que los generaban tenían una alta tensión aplicada que en general era inferior a los 10 kilovolts.⁽⁴⁾

Después de estos comentarios técnicos volvamos al principio de siglo. En 1900 se creó en EE.UU. la American Roentgen Society, que dos años después se llamaría American Roentgen Ray Society. Sus miembros provenían fundamentalmente de los estados del este de los

(4) La relación entre la alta tensión aplicada (V) y la longitud de onda (λ) para la parte de máxima energía de la radiación X (es decir, la que tiene menor longitud de onda) es $\lambda = 12,3/V$ si la longitud de onda se indica en Å y la tensión en kilovolts.

EE.UU. Esta sociedad se completó en 1915 con una Western Roentgen Society, que obtuvo tanta popularidad que dio lugar a una nueva organización en 1920: La Radiological Society of North America, que es actualmente la sociedad de radiología más grande del mundo. En 1923 fue creada una asociación más ilustre por iniciativa del radioterapeuta de Los Angeles *Albert Soiland*, bajo el nombre de American College of Radiology. Ser parte de esta asociación era una distinción y sus miembros podían lucir las iniciales “F.A.C.R.” para demostrar que eran “fellows”, es decir, miembros de esta sociedad.

Desde el punto de vista de la radioprotección es más importante la creación en Inglaterra en 1900 del National Physical Laboratory (NPL), el centro de pruebas e investigación británico, situado en Teddington, al sudoeste de Londres. La responsabilidad científica de NPL estuvo a cargo en un principio de la Royal Society, la academia de ciencias inglesa desde el siglo XVII. NPL fue durante mucho tiempo, junto con la estadounidense National Bureau of Standards (NBS, desde 1901) y la alemana Physikalisch-Technische Reichsanstalt (PTR), activa en el campo de la radioprotección. NBS fue reemplazada desde 1988 por el National Institute of Standards and Technology (NIST). La institución alemana, fundada en 1887 en Berlín por iniciativa de *Werner von Siemens* (1816—1892), se llama en la actualidad Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) y tiene su actividad principal en Braunschweig. Su primer director fue el físico *Hermann von Helmholtz*, y antes de la II Guerra Mundial, PTR se encontraba en Berlín-Charlottenburg.

Las instituciones mencionadas no trabajaron con radiación durante la primera década del siglo. La actividad de NPL en el área comenzó en 1908 cuando *E. Kitto* se dirigió al laboratorio solicitando ayuda para estimar la cantidad de radio en una muestra de pechblenda, un pedido que fue denegado. Recién en 1912 comenzó la verdadera actividad, cuando el profesor Rutherford negoció con el Ministerio de Asuntos Exteriores acerca del estándar de radio británico propuesto para ser emplazado en NPL.

En Estocolmo existía a principios de siglo una empresa llamada “John Anderssons Elektro-Tekn. Byrå”, con oficinas en Klarabergsgatan 58. Su razón social, obtenida en 1898, tenía su origen en el ingeniero *John Andersson* (1862—1939), quien fundó la empresa en 1890. Su empresa trabajaba en la colocación de pararrayos y en la instalación de timbres y teléfonos. Andersson fundó en 1901 una nueva empresa: “Åskledarkontrollanstalten”. Quizá valga la pena mencionar que él y su esposa donaron 600.000 coronas a la universidad de Uppsala en 1918 a una fundación que luego utilizaría el dinero en la creación de una cátedra de electricidad orientada particularmente a las descargas atmosféricas, o, en otras palabras, a la investigación de las tormentas.

En 1899 John Andersson tuvo un nuevo colaborador, el ingeniero recién recibido *Bror Edvard Järnh* (1879—1956). Andersson se dedicó después de 1901 al control de las tormentas y dejó su firma en 1902 al ingeniero Järnh, que amplió las actividades de la empresa incluyendo ahora instalaciones eléctricas y de iluminación. No faltaba mucho para agregar aparatos de rayos X.

En Estocolmo el gran hospital municipal Sabbatsberg recibió su primer equipo de rayos X en 1900. Estuvo a cargo de Tage Sjögren, quien solo necesitaba asistir al hospital dos o tres veces por semana. Según el informe de Moritz Simon sobre los comienzos de la actividad, la conducción del hospital no comprendía muy bien las dificultades y los riesgos del trabajo con los rayos X. El director del hospital se preguntaba si realmente era necesario contar con un médico: El farmacéutico del hospital, ¿no podía dedicarse a tomar las placas de rayos X?

En 1906 fue nombrado jefe del departamento de rayos X del Hospital Serafimer de Estocolmo, Gösta Forssell, lugar donde Simon había sido asistente en 1907—1908. Simon recordaría luego:

Todas las mañanas se controlaban los 4-6 tubos de rayos X y se regeneraban si era necesario. Eran colocados en orden según su grado de dureza. El más blando de los tubos era utilizado para dedos y otras partes pequeñas del cuerpo, los que eran un poco más duros para partes más robustas del cuerpo y los más duros, para radioterapia. Cuando un tubo era nuevo, no se permitía realizar ninguna regeneración antes de haber pasado sucesivamente por el estadio de los dedos, pasando por los codos y las rodillas hasta la cadera y la columna vertebral. Cuando el tubo había sido regenerado se endurecía más rápido que antes y debía ser ablandado cada día hasta el grado en que mejor funcionaba. Cada tubo era un individuo de una manera en que apenas nos imaginamos, y gran parte de la tecnología consistía en el elegir el mejor tubo para cada estudio.

[...]

Cada exposición debía realizarse de manera mucho más individual que hoy [en 1926]. Cuando un paciente había sido fijado en la posición y todo estaba listo para la exposición, se prendía una corriente suave y la potencia de la corriente primaria se aumentaba gradualmente hasta que el tubo mostraba una luz pareja; se ponía en marcha el cronómetro y se elegía el tiempo de exposición en relación a la dureza del tubo y la potencia de la luz. La potencia de la luz era observada detenidamente y cuando cambiaba también debía modificarse la potencia de la corriente y el tiempo de exposición.

Para radioterapia se utilizaban pastillas Bordier y Sabouraud—Noiré. Eran dosímetros químicos en forma de tabletas de platino-cianuro de bario comprimido. La dosis de radiación se determinaba con la ayuda del cambio de color de las tabletas. Esos dosímetros químicos fueron desarrollados en la primera década del siglo XX por los franceses *Raymond Sabouraud* (1864—1938) y *Léonard Bordier* (1863—1943), pero también por los austríacos *Robert Kienböck* (1871—1954) y *Guido Holzknecht* (1872—1931). El dosímetro químico fue pronto reemplazado por métodos de medición más sensibles y exactos, basados en la capacidad de la radiación de ionizar el aire, haciéndolo conductor eléctrico.

La radioprotección del Hospital Serafimer era sorprendentemente buena. Simon escribió:

La distancia del foco a la piel se medía exactamente y el campo de la terapia profunda estaba cubierto por un disco de aluminio de 1 mm de espesor. Cuando él instruía a sus asistentes y alumnos, Forsell subrayaba siempre el principio de aumentar la distancia para obtener mejor homogeneidad, necesaria para tumores malignos, con menor riesgo para la piel.

Las dosis únicas se hicieron relativamente grandes y después de cada sesión no se daba una dosis nueva en el mismo campo hasta que pasaran varias semanas o incluso más tiempo.

Se invirtió mucho trabajo para lograr la adecuada protección contra las lesiones causadas por la exposición involuntaria o radiación demasiado potente: gran parte del tubo de rayos X estaba confinado en una caja de vidrio o caucho con óxido de plomo. Alrededor del campo expuesto se colocaban láminas de plomo: Cada exposición era manipulada detrás de una pantalla de plomo. El método de probar el tubo iluminando la mano del operador estaba estrictamente prohibido.

No se conocen lesiones causadas por la corriente eléctrica. Recogíamos las chispas de los tubos o cables sobre nuestros dedos para demostrar que no había riesgo de esa clase.⁽⁵⁾

La utilización de láminas de aluminio para cubrir al paciente en el campo de irradiación exige un comentario. Era una medida habitual pero ya en 1902 Holznecht la había criticado pues consideraba que el efecto protector era insignificante. Según el competente inspector sueco de radioprotección Lars Lorentzon existía probablemente un malentendido de los contextos físicos detrás del método: Se creía que lo que causaba daño eran las descargas eléctricas en el tubo de rayos X y que la lámina de aluminio podría detener el campo eléctrico. Los aparatos y la tecnología que se utilizaban en la radiología de principios de siglo han sido descritos en el *Kompendium d. Röntgenographie* (Leipzig 1905) por Dessauer–Wiesner, *Radiotherapie* (Stuttgart 1907) por Kienböck, y *Handbuch der Röntgentherapie* (Leipzig 1908) por Wetterer, entre otros.

Paralelamente con este uso temprano de la radioterapia, fundamentalmente para tumores superficiales, tenía lugar un desarrollo de métodos de radioterapia con radio. En el capítulo 8 he mencionado el interés de Pierre Curie por los efectos biológicos de la radiación de radio. Ya en 1901 el matrimonio Curie había prestado un preparado de radio a *Henri Danlos* (1844–1912) del Hôpital St. Louis en París, razón por la cual Danlos debió haber sido el primero que utilizó el radio para radioterapia.

A medida que la demanda de radio crecía, aumentaba la fabricación en diferentes partes del mundo. En 1920 la Union Minière du Haut Katanga y su filial Radio Belge comenzaron a producir radio en gran escala. El mineral se embarcaba en el Congo belga y era transportado hasta Bélgica donde se extraía el radio. La actividad provocó que el precio del radio cayó a 70.000 dólares por gramo. En EE.UU. se extraía mineral de uranio en Colorado (Paradox Valley). En Canadá se encontró mineral de uranio junto al lago Great Bear.

La forma más sencilla de radioterapia era el tratamiento de contacto superficial (“braquiterapia” del griego *brachys* = corto), mediante la colocación en la piel de sal de radio encapsulada en láminas o agujas, de manera directa o con un aplicador para asegurar la geometría. Gracias a las mediciones o cálculos se podía estimar las dosis en diferentes puntos del cuerpo irradiado. El primer tratamiento exitoso de radioterapia de esta clase fue realizado en San Petersburgo por *Goldberg* y *Efim S. Londres* (1869–1939) en 1903. Recién con la llegada de los métodos de cálculo, se pudo realizar la dosificación de manera correcta bajo controles adecuados. Algunos de esos métodos fueron descritos por Sievert en 1921. También cabe mencionar la estandarización de la colocación del preparado de radio, como el *Método Manchester* (desarrollado por *Ralston Paterson* [1897–1981] y *Herbert Parker* [1910–1984] durante la década de 1930). Los buenos resultados de los tratamientos anteriores dependían completamente de la experiencia e intuición del radiólogo.

Una forma especial de braquiterapia era la radioterapia *intersticial*, donde el radio se introducía en las cavidades del cuerpo. Como curiosidad cabe mencionar que el inventor del teléfono, *Alexander Graham Bell* (1847–1922) propuso esos tratamientos en una carta a la publicación *American Medicine* en 1903. La carta formó parte de un intercambio epistolar con un médico llamado *Sowers* y decía lo siguiente:

Estimado Sr. Sowers,

He comprendido que lo que usted ha escrito sobre los rayos röntgen y los rayos que se emiten a partir del radio han tenido un buen efecto en el cáncer superficial, pero que el efecto en tumores más profundos todavía no es satisfactorio.

(5) En algunos países hubo casos de muertes por el contacto con cables de alta tensión, cuando la fuente de alimentación de alta tensión era capaz de emitir más cantidad de energía que las primeras bobinas sencillas.

Creo que una causa de la naturaleza insatisfactoria del segundo experimento proviene del hecho de que los rayos son aplicados desde el exterior y por lo tanto deben pasar a través de tejidos sanos en diferentes profundidades para alcanzar el tejido canceroso.

El tubo crookeano, del cual proviene la radiación röntgen, es naturalmente demasiado voluminoso para poder ser introducido en la masa cancerígena, pero no existen motivos por los cuales no podría introducirse una cantidad insignificante de radio dentro de un fino tubo de vidrio en el centro del cáncer y de esa manera obtener un efecto directo sobre el material enfermo. ¿No valdría la pena experimentar en esa dirección?

Alexander Graham Bell

Pero Bell no fue el primero que tuvo esta idea. Fue probablemente un médico de Munich, *H. Strebel* quien utilizó esta técnica ese mismo año. Entre los pioneros estadounidenses de la radioterapia están *Margaret Cleaves* (1848–1917) de Nueva York, quien trató un cáncer uterino con un preparado de radio mediante braquiterapia intracavitaria en 1903. *Robert Abbe* (1851–1928), del Hospital St. Luke de Nueva York fue el primero en introducir un preparado de radio en un tumor en 1905.

Howard Kelly (1858–1943), ginecólogo de la clínica Johns Hopkins en Baltimore, también trató un cáncer uterino en 1904. Kelly tomó la iniciativa de establecer el National Radio Institute en 1914, con el apoyo de US Bureau of Mines, que, con radio proveniente de las minas de Paradox Valley y purificado en Denver, proveyó de fuentes de radiación tanto a sí mismo como al Memorial Hospital de Nueva York. Se produjeron en total entre 8 y 9 gramos de radio. Kelly obtuvo 5 ½ gramos.

Se desarrollaron diferentes técnicas para el tratamiento del cáncer uterino (el cáncer cervical es cáncer en el cuello del útero, el cual es más común que el cáncer de cuerpo del útero). Las diferencias entre esas técnicas podían consistir en la forma del aplicador, la cantidad de radio y su distribución, el número de tratamientos y su prolongación y distribución en el tiempo. Algunos de los centros importantes para este tipo de tratamiento eran la Fondation Curie de París, Radiohemmet de Estocolmo (donde *James Heyman* desarrolló el así llamado “Método de Estocolmo”) y la clínica de Kelly en Baltimore.

En 1916 Kelly recibió ayuda de Rutherford para establecer un laboratorio de radón para la producción de ampollas de vidrio con radón. Después de algunas horas contienen aproximadamente la misma cantidad de productos hija emisores de radiación gamma que un preparado de radio con la misma intensidad que la utilizada en la fabricación del preparado de radón. La planta funcionó hasta 1959.

Pero quién más utilizó el preparado de radón fue el radiólogo de Nueva York *Henry Janeway* (1873–1921), famoso por su método con “buried emanation” en 1920. Él implantaba ampollas con radón muy cerca del tumor cuando era posible y dejaba la ampolla “enterrada” allí. No causaba lesión alguna, ya que el radón después de algunas semanas decaía en forma prácticamente total (el radón-222 tiene un período de semidesintegración de 3,8 días).

Sin embargo, el método de Janeway tenía sus desventajas. La radiación beta que atraviesa el vidrio genera dosis de radiación demasiado elevadas junto a las ampollas, cuya consecuencia es la muerte de tejidos. El radiofísico de Janeway, *Gioacchino Failla* (1890–1960) tuvo la idea de crear lo que llamó “filtered seeds”: Las ampollas de vidrio fueron cubiertas con una fina capa de oro que impedía la radiación beta. Failla era un hombre muy simpático e inteligente con quien yo mismo colaboraría de manera estrecha en la década de 1950, cuando tuvo un importante papel en la Comisión Internacional de Protección Radiológica (ICRP).

El trabajo con radio y radón irradiaba altas dosis de radiación al personal, en particular cuando los aplicadores eran embalados con agujas de radio o láminas. La idea de colocar un aplicador vacío sobre o dentro del paciente y luego introducir radio (“técnica de carga diferida”) se comenzó a utilizar en 1903 por Strebel y en 1906 por el cirujano de Nueva York Robert Abbe. Esta técnica permitía poder colocar los aplicadores en la posición correcta con calma. La carga diferida remota (“remote afterloading”) con radio era técnicamente difícil debido a la forma y sensibilidad del preparado de radio. Pasaría alrededor de medio siglo antes de que la técnica de carga diferida ganara terreno gracias a la posibilidad de adecuar las fuentes de radiación artificialmente creadas a los requisitos técnicos.

Al tener mayor acceso al radio, se comenzó a completar la técnica de braquiterapia con radio con la de “teleradio”, es decir, el tratamiento a distancia. Los primeros dispositivos para este objetivo fueron denominados “bombas de radio” o “cañones de radio” porque se “disparaba” hacia el tumor. Gracias a la distancia (todavía muy escasa) se podían tratar tumores un poco más profundos, principalmente en las áreas que suelen resumirse con la denominación “nariz-garganta-oidos”. El primer aparato para tratamiento con teleradio fue instalado en 1919 en el Hospital Middlesex de Londres y utilizaba 2,5 gramos de radio. El acceso al radio era limitado y el precio fue durante mucho tiempo superior a 100.000 coronas por gramo. Los primeros cañones de radio estaban compuestos por un cilindro de plomo montado en un soporte, en el cual se podían colocar los preparados de radio disponibles en ese entonces. Ese aparato fue construido en 1923 para la institución sueca Radiohemmet (El Hogar del Radio) por *Erik Lysholm* (1891–1947), un radiólogo técnicamente muy hábil, que luego crearía dos productos de fama mundial: *La rejilla de Lysholm* y el *Craneógrafo de Lysholm* para ajuste de precisión del tubo de rayos X en estudios del cráneo.

Los cañones de radio posteriores utilizaron un cartucho cargado con tubos especiales con radio, que con frecuencia contenían 50 miligramos en cada tubo. Cuando las ambiciones de mayor protección aumentaron, se construyó un dispositivo para que el cartucho pudiera ser transportado, cuando no se utilizaba el “cañón”, de una posición de tratamiento a una posición de protección. En los cañones de radio de Radiohemmet el recipiente de la posición de protección y la cabeza de tratamiento constituían una unidad montada sobre un soporte. Estos dispositivos fueron mejorados sucesivamente mediante construcciones nuevas, primero por Sievert y luego por Benner en 1926, 1933, 1937 y 1947. A comienzos de la década de 1950, Radiohemmet tenía dos cañones de radio para 3 y 5 gramos de radio, respectivamente.

Las mayores cantidades de radio dificultaron la posibilidad de ofrecer suficiente blindaje ante el radio en la posición de protección. Algunas construcciones utilizaron por ello un transporte neumático de cartuchos de radio con una manguera de aproximadamente 3 metros desde el aparato de tratamiento hasta un contenedor bien blindado incorporado a una pared. En Inglaterra esos cañones de radio eran fabricados por la firma Bryant Symons. La desventaja de esta construcción “más segura” era que el cartucho de radio quedaba inserto en la pared de vez en cuando, lo cual significaba mayores riesgos para el personal.

La radioterapia con rayos X permitió mayor distancia durante el tratamiento y con ello menores problemas con la dependencia de la distancia de la intensidad de la radiación. En su lugar surgieron problemas con la menor capacidad de penetración de la radiación X, ya que la tensión del tubo de rayos X no era de más de 200–250 kilovoltios (kV). Se realizaron esfuerzos para obtener aparatos de tratamiento con mayor tensión. En 1931 se instaló un aparato de 750 kV de tensión en el Memorial Hospital de Nueva York.

En 1929 el profesor de física estadounidense *Robert Van de Graaff* (1901–1967) del Massachusetts Institute of Technology construyó un generador de alta tensión que recibió su

nombre. El generador Van de Graaff es un generador de cinta en el que una cinta sinfín de un material aislante está colocada sobre dos cilindros. Uno de ellos está conectado a tierra, mientras que el otro, que se asienta en una esfera metálica hueca, está aislado de tierra. Un peine de puntas de aguja, con un potencial de algunas decenas de kilovoltios, suministra a la cinta cargas eléctricas. Cuando la cinta se mueve sobre los cilindros las cargas se trasladan al cilindro superior que de esta manera recibe una carga eléctrica cada vez mayor y con ello una tensión alta a tierra.

En 1933 se construyó un generador de Van de Graaff de 5 millones de voltios (5 MV) en South Dartmouth, Massachusetts. El primer generador de Van de Graaff para uso clínico fue instalado en 1937 en el Massachusetts Memorial Hospital de Boston y generaba una tensión de 1 MV. La alta tensión se utilizaba para acelerar los electrones en el tubo de rayos X. Los auténticos aceleradores (por ejemplo los betatrones y los aceleradores lineales) para uso clínico no existían en la década de 1930, pero *Ernest Lawrence* (1901–1958) construyó un *ciclotrón* para la investigación física en 1931. El primer ciclotrón sueco, todavía utilizado para la investigación clínica, entró en servicio en 1937 en el Instituto de Investigaciones de la Academia de Ciencias para la física, en Frescati en Estocolmo (en el actual Instituto Manne Siegbahn). Había sido construido bajo la dirección del físico *Sten von Friesen* (1907–1996).

Los equipos técnicos cada vez más avanzados le dieron a la radiación X mayor intensidad y la posibilidad de irradiar desde mayor distancia, lo cual disminuía el molesto efecto de la ley de la inversa del cuadrado. También fue posible irradiar tumores profundos. Todavía las dosis de radiación afectaban la piel en el lugar donde el haz luminoso primario incidía contra el cuerpo, un límite para la dosis de radiación que constituía el único tratamiento de los tumores profundos. Se lo podía evitar mediante la irradiación del cuerpo desde diferentes direcciones, distribuyendo así la irradiación de la piel. Esto exigía un cálculo de las dosis de radiación en las diferentes partes del cuerpo entre la piel y el tumor y una *planificación de dosis*.

Una herramienta para la planificación de dosis era una representación gráfica de cómo la dosis de radiación de un campo de tratamiento dado podía variar en profundidad y lateralidad en el cuerpo. Se establecía mediante la unión de puntos de iguales dosis de radiación con curvas llamadas *curvas de isodosis*. El pintoresco radiofísico inglés, y luego miembro de ICRP, *W.V. Mayneord* (1902–1988) describió en 1929 en su libro *The Physics of X-Ray Theory* el uso de las curvas de isodosis con las siguientes palabras:

El resultado de las mediciones en un intervalo de, por ejemplo, 1 cm sobre todo el haz de radiación röntgen, puede ser representado adecuadamente por una serie de curvas que unen los puntos que tienen la misma dosis por segundo. Es decir: hemos dibujados “líneas de isodosis” del mismo modo que los mapas del clima en el Times, uniendo puntos que tienen la misma presión atmosférica o temperatura, obteniendo así isobaras o isotermas.

Las primeras curvas de isodosis fueron realizadas, entre otros, por *Friedrich Dessauer* (1881–1963) y *Hans Holfelder*, ambos de Frankfurt am Main. En 1920, al realizar la planificación de dosis en los casos en que el haz de radiación ingresaba desde diferentes direcciones con el objeto de cuidar la piel, se procedía de la siguiente manera: se calculaba la contribución de la dosis desde cada haz de radiación en un número de puntos de interés y alrededor del tumor que se deseaba destruir. Cuando se utilizaban curvas de isodosis (como en los casos en que se superponían de tal modo que dos haces de curvas de isodosis formaban una red) se podían obtener fácilmente las curvas para el total de las dosis mediante el trazado de diagonales en la red.

Obviamente las curvas de isodosis no estuvieron bien definidas antes de que en 1928 se estableciera la unidad röntgen para la exposición a la radiación. Los primeros aportes de Rolf Sievert a la institución Radiohemmet en Estocolmo a principios de la década de 1920 fueron los cálculos de la intensidad de la radiación en los preparados de radio de diferente geometría. Sievert recomendaba expresar la intensidad de la radiación en relación a la intensidad de la radiación gamma desde una determinada cantidad de radio a una distancia dada, y mantenía una disputa científica con el físico alemán (luego ciudadano estadounidense) *Otto Glasser* acerca de las curvas de isodosis. Glasser había utilizado esta denominación en un artículo en 1922, mientras que Sievert prefería hablar de “isointensidad” ya que era la intensidad de la radiación y no la dosis lo que habían calculado ambos.

La física médica estadounidense *Edith Quimby* utilizó en 1932 la *dosis para eritema cutáneo* (véase el cap.12) como unidad para sus curvas de isodosis, pero en 1944 decidió expresarlas en röntgen.

11 | La Primera Guerra Mundial oscurece al mundo

Los avances en la física relacionados con el descubrimiento de la radioactividad que realizó Becquerel se debieron en gran parte a la investigación que tuvo lugar en el laboratorio Cavendish en Cambridge. En este capítulo me referiré con más entusiasmo acerca de otros hechos en el campo de las ciencias naturales durante el período comprendido entre fines del siglo XVIII hasta la I Guerra Mundial, hechos de importancia para la física de las radiaciones y la radioprotección durante los años posteriores.

Ya he mencionado fugazmente los aportes de Philipp von Lenard a fines del siglo XIX, cómo experimentó con los rayos catódicos en su condición de colaborador de Hertz y la manera en que contribuyó al nivel de conocimientos existente cuando Röntgen realizó su gran descubrimiento. Lamentablemente Lenard tendría un papel desagradable en la Alemania nazi (véase el cap. 17). Casi un año y medio después del descubrimiento de Röntgen, le escribió una carta a éste, algo de lo que debe haberse arrepentido profundamente, pero gracias a ella podemos conocer lo que probablemente sea la verdad. La carta está fechada el 21 de mayo de 1897:

Debido a que su gran descubrimiento ha despertado tanta atención incluso en los círculos más lejanos, mi humilde trabajo está en el candelero afortunadamente para mí, y estoy sumamente contento de haber contado con su amable participación.

Sin embargo no utilizaría los mismos términos más tarde, cuando Lenard hizo todo para minimizar los aportes de Röntgen, afirmando que en realidad había sido él quien debería ser considerado como el descubridor de la radiación röntgen. En una entrevista concedida después de la II Guerra Mundial, Lenard afirmó:

Soy la madre de los rayos röntgen. Así como una partera no es la única responsable del nacimiento en sí mismo, Röntgen no fue el responsable del descubrimiento de los rayos X. Todo lo que Röntgen necesitó hacer fue presionar un botón, ya que todo el trabajo previo lo había realizado yo.

En el célebre *Deutsche Physik* de Lenard de 1936 no se menciona ni a Röntgen ni a Einstein. El honor de Röntgen se vio favorecido debido a la carta escrita por Lenard en 1897 y es una suerte que ésta se haya conservado. Quizá Röntgen tenía presentimientos: dejó que se destruyeran casi todos los demás documentos que tenía.

Cuando comenzó el nuevo siglo la investigación de la física estaba orientada hacia el descubrimiento de los secretos del átomo desde el momento en que la radioactividad fue descubierta, y se realizaron otros importantes descubrimientos simplemente por inercia. Röntgen había descubierto en 1896 la capacidad de los rayos X de ionizar el aire. La ionización del aire fue luego durante mucho tiempo uno de los principales instrumentos de medición, no solo de las propiedades de los rayos X sino también en el estudio de las sustancias radioactivas.

Ya en 1900 Charles Wilson (1869–1959) observó que la ionización era mensurable en un volumen de aire cerrado, aunque no pudo probar la presencia de alguna sustancia radioactiva. Wilson era físico, meteorólogo y conferenciante de física en Cambridge. Sería el inventor de la *cámara de niebla*, llamada con frecuencia “Cámara Wilson” para detectar las ionizaciones a lo largo de las trayectorias de las partículas ionizadas. En una cámara de niebla hay un volumen de aire cerrado que está lleno de vapor de agua u otro gas que se encuentra cerca del punto de condensación. Si se aumenta el volumen de la cámara repentinamente, disminuye la temperatura y el vapor se sobresatura y se condensa en gotas ante la menor alteración. Esa alteración son las ionizaciones que se forman en el vapor por las partículas ionizantes. El vapor se condensa en

gotas a lo largo de las trayectorias de la partícula que luego pueden ser observadas y fotografiadas. El fenómeno es el mismo que se produce cuando un avión bajo circunstancias semejantes forma estelas de vapor de agua condensado a su paso. Wilson obtuvo el premio Nobel en 1927 por la cámara de niebla. Gracias a esa cámara Chadwick pudo demostrar luego la existencia del neutrón.

En 1900, Wilson descubrió la ionización sin una evidente fuente de radiación. Las mismas observaciones habían sido realizadas por los físicos alemanes *Julius Elster* (1854–1920) y *Hans Geitel* (1855–1923). Otros investigadores, entre ellos Rutherford, descubrieron que esta ionización disminuía si se rodeaba el volumen de aire ionizado con material absorbente, libre de sustancias radioactivas. Por lo tanto, la conclusión debía ser que la ionización era causada por radiación proveniente desde afuera.

La presencia de sustancias radioactivas en el suelo y en el material de construcción fue descubierta pronto. *H.L. Cook* demostró en 1903 la existencia de radiación γ en el suelo y en las tejas. *C.J. Wright* descubrió en 1909 que la ionización dentro de una casa era casi el doble de la existente en el exterior de la misma. *Campbell* y *R.W. Wood* (1868–1955) descubrieron en 1906 que el potasio emitía radiación gamma (que ahora sabemos proviene del potasio-40).

Algunos investigadores descubrirían luego que la ionización observada disminuía si se colocaba el volumen de aire estudiado sobre la superficie del agua o hielo de un glaciar. Eso indicaba que las sustancias radioactivas estaban fundamentalmente en el suelo, por ejemplo, en los nucleidos de la cadena de desintegración del uranio, que emitían radiación ionizante. Uno de esos investigadores, *T. Wulf*, quiso demostrar cómo la intensidad de la radiación decrece con la distancia del suelo y por ello llevó consigo una cámara de ionización a la torre Eiffel. Sin embargo descubrió que la disminución era más pequeña de lo esperado. Otro investigador, *A. Gockel* (1860–1927), realizó mediciones con el mismo propósito durante un viaje en globo, pero tampoco encontró la esperada disminución. Lo que sí descubrió Gockel fue una disminución lenta y luego un aumento de la ionización a mayores alturas. Ahora había solo dos explicaciones posibles. O bien existía una fuente de radiación a gran altura, o la absorción de la radiación γ en el aire era menor a la esperada.

El físico austriaco *Victor Hess* (1883–1964), que en la década de 1910 era docente en Viena, excluyó rápidamente esta última posibilidad. El realizó mediciones de la absorción de la radiación γ en el aire y descubrió que era más o menos tan grande como en el agua. Restaba la posibilidad de una fuente de radiación a gran altura. Wilson ya se había pronunciado sobre la cuestión en 1901 (según *Liljeström*):

Los experimentos que estamos realizando acerca de la ionización del aire nos permiten establecer que la ionización que se libera depende de fuentes de radiación que se encuentran fuera de nuestra atmósfera y son análogas a la radiación X o a los rayos catódicos pero con una capacidad de penetración mucho mayor.

Para investigar esa posibilidad, Hess utilizó entre 1911 y 1913 diez globos con instrumentos de medición, mejores que aquellos a los que habían tenido acceso los investigadores anteriores. Hess pudo ratificar los resultados de Gockel, y demostró con mediciones minuciosas que no podían existir dudas de la existencia de una radiación penetrante que llegaba a la Tierra desde afuera y que tenía la capacidad de atravesar la atmósfera hasta la superficie terrestre y contribuir a la ionización del aire.

El físico alemán *Werner Kohlhörster* de Halle realizó ascensiones en globo a mayor altura que las realizadas por Hess y descubrió que la ionización continuaba aumentando con la altura. Otras mediciones realizadas a mayor altura todavía confirmaron la existencia de una radiación

muy “dura”, es decir, penetrante, proveniente del espacio. Esa radiación recibiría el nombre de “Radiación de Hess”, o “ultrarradiación”. Actualmente la llamamos *radiación cósmica*.⁽¹⁾

Hess obtuvo el premio Nobel de física en 1936 por su aporte al descubrimiento de la radiación cósmica. Cuando Hitler anexó a Austria, huyó a EE.UU. en 1938, donde fue profesor en la universidad Fordham de Nueva York. Hess fue sin dudas quien a través de estudios metódicos esclareció el fenómeno. Pero como tantas veces antes, vemos que el descubrimiento creció gradualmente: con la primera observación de Wilson en 1900 y la profecía en 1901, las observaciones de Wulf y Gockel y las suposiciones en 1910 y las mediciones confirmatorias de Kohlhörster.

La demostración de Hess de la radiación cósmica en 1912 provocó el interés de los físicos, mientras el interés por la radiación γ del suelo disminuyó y recién renació cuando se comenzó a buscar uranio para los reactores nucleares. El recuerdo de las observaciones acerca de la “radiación desde el suelo” vivió durante mucho tiempo y la creencia popular acerca de la existencia de una “radiación terrestre” mística (“Erdstrahlung”) creció sin estar relacionada con las observaciones científicas. Es interesante destacar que esta creencia sobre una supuesta ciencia fue revivida a comienzos de 1996 en revistas y diarios suecos. Se publicaron artículos con absoluta seriedad acerca de la red de líneas Curry y otros conceptos inventados bajo el signo de la superstición.

En 1904 Pierre Curie y E. Laborde demostraron la existencia de alto contenido de radón en el agua de “fuentes de manantial de aguas medicinales”. Esto llevó a realizar importantes estudios de los efectos medicinales del radón hasta la década de 1940, cuando comenzó a dardarse acerca de ellos. Incluso hoy existen países donde se anuncia con orgullo las “propiedades vivificantes” de esas fuentes y no fue hace demasiado tiempo que los datos de la proporción de radón eran indicados en las etiquetas de muchas aguas de mesa. Un excelente resumen sobre los conocimientos existentes hasta 1927 fue publicado por Stefan Meyer y Egon Schweidler (*Radioaktivität*, B.G. Teubner, Leipzig 1927).

En Suecia la química Naima Sahlbom (nacida en 1871) realizó numerosas mediciones de radón en el agua potable. Ella fundó un laboratorio privado en Estocolmo para los análisis de minerales, rocas y agua en 1914. Sahlbom verificó sus datos acerca del radón en el agua en 1907 con el profesor de mineralogía Hjalmar Sjögren (1856–1922), quien luego sería intendente del Museo Nacional de Historia Natural. Ella publicó en 1915 los resultados de las mediciones de radón en 160 pozos profundos, donde encontró radón de entre 5 y 50 unidades Mache, que de acuerdo con las unidades utilizadas hoy equivalen a entre 80 y 800 becquerel (Bq) por litro.⁽²⁾ Valores semejantes se miden todavía en esos pozos.

(1) La radiación cósmica primaria está compuesta fundamentalmente por núcleos atómicos con energía cinética (107–1020 electronvoltios) y por electrones de alta energía y radiación γ . Esta radiación primaria no alcanza afortunadamente a la Tierra sino que es absorbida por la atmósfera. Las partículas primarias generan reacciones nucleares a gran altura (15–25 km) donde se forman mesones, entre otros los mesones π^+ , que decaen rápidamente y generan radiación γ que es absorbida por formación de pares. Los electrones y positrones emiten energía que dan lugar a la radiación de frenado. Los mesones π^+ cargados pueden decaer en un muón (μ^+ o en un mesón π^0) y un neutrino. La radiación cósmica secundaria que llega a la superficie terrestre está compuesta en gran parte por muones (parientes de los electrones y positrones, pero con una masa aproximadamente 200 veces mayor), que en algunos microsegundos decaen en electrones y neutrinos.

(2) La unidad Mache es una unidad acerca de la cual se han dado diferentes definiciones. Se propuso originalmente en 1904, y la magnitud a la que hacía referencia era la concentración de radón en el agua, una magnitud que en la actualidad se expresa en becquerel por litro (Bq/l). Puesto que la presencia del radón fue demostrada mediante ionización, Robert Knox (1867–1928) introdujo en 1918 una definición de la unidad Mache: es la concentración de radón que puede conservar una corriente de 1/1 000 unidades electrostáticas por segundo en un litro de agua. La unidad Mache se consideraba entonces equivalente a 450 picocurie por litro (pCi/l). Otra cantidad comparativa que aparece con frecuencia es 364 pCi/l. El profesor Hermann Holthusen (véase el cap. 14), que en 1913 escribió sobre la concentración de radón en la sangre, utilizó la cifra comparativa 500 pCi/l. Puesto que 1 pCi/l es igual a 0,037 Bq/l, se estima que 1 unidad Mache era equivalente a entre 13 y 19 Bq/l o en general a aproximadamente 16 Bq/l.

Ya Marie Curie se había quejado por la capa radioactiva que se formaba cuando los productos hija del radón se adherían a paredes e instrumentos. La capa de vida larga que queda cuando los productos hija de corta vida han decaído después de algunas horas es plomo-210 (“radio D”), que tiene un período de semidesintegración de 22 años. Este plomo al decaer forma bismuto-210 de vida corta (“radio E”), que emite radiación dura β . El bismuto decae a su vez en polonio-210, que tiene un período de semidesintegración de 140 días y decae en plomo estable. Después de algunos años, tanto el polonio como el bismuto alcanzan el equilibrio radiactivo con el plomo-210 de la capa, es decir, tiene la misma actividad (número de desintegraciones por segundo) mientras que la actividad del plomo de la capa aumenta lentamente hasta alcanzar un equilibrio con el radón en el aire.

El hombre que le dio su denominación a la unidad Mache, *Heinrich Mache* (1876–1934) y *T. Rimmer* descubrieron en 1906 que la ionización en la superficie terrestre aumenta después de la lluvia. Se debe a que la lluvia lava los productos hijos radiactivos que se forman por el radón del aire y los precipita sobre el suelo. El primero en calcular ese mismo año la relación entre el porcentaje de las sustancias radioactivas existentes de manera natural en la capa del suelo y el de la consiguiente ionización causada en el aire fue *A.S. Eve*.

En 1905 Lenard obtuvo el premio Nobel de física por sus trabajos con los tubos catódicos. En su conferencia con motivo de la entrega del premio Nobel, expresó su convencimiento sobre la existencia del éter y le envió una indirecta a los físicos de Cavendish: “En alto vacío los rayos catódicos viajan trayectos de metros de distancia y por lo tanto son fenómenos étericos. No es la ‘materia radioactiva’ a la que uno está acostumbrado a observar en Inglaterra.” También había comenzado a cuestionar el aporte de Röntgen.

En Berlín, a comienzos del siglo XX, trabajaba uno de los más eminentes químicos del mundo, el profesor *Emil Fischer* (1852–1919), un pionero de la química orgánica. Otto Hahn fue a reunirse con Fischer en Berlín en 1907, después de haber pasado un año con Rutherford en Montreal. Ese mismo año Rutherford se mudó a Manchester.

Hahn (que ya antes de viajar a Montreal había descubierto el torio-228, “radiotorio”, y que en Canadá continuó incrementando su destreza en el campo de la radioquímica) era admirado por los colaboradores de Fischer. Fischer, que no sabía demasiado acerca de la radioactividad, se había dado cuenta de la capacidad de Hahn, pero los demás químicos eran desconfiados: ¿Era Hahn en realidad un verdadero químico? Hahn fue remitido a un cobertizo en el sótano de la universidad donde colocó su electrómetro de hojas de oro para demostrar y medir las sustancias radiactivas que pudo aislar.

Como consecuencia del escaso interés e ignorancia de los otros químicos acerca de la radioactividad, Hahn adoptó como costumbre asistir a los seminarios de los físicos. Allí conoció a una joven física austríaca que recién había arribado procedente de Viena y que todavía no se había adaptado. Su nombre era *Lise Meitner* (1878–1968). Fue la segunda mujer en defender una tesis en la universidad de Viena y había llegado a Berlín para asistir a las conferencias de Max Planck sobre física teórica. Ya había alcanzado a escribir un par de artículos acerca de la radiación de las sustancias radioactivas y por eso despertó el interés de Hahn. El tenía 28 años y ella 29 cuando se conocieron, pero en muchos aspectos eran lo opuesto uno del otro. Lise Meitner era una judía pequeña, de cabello oscuro, con una actitud aristocrática combinada con una timidez que tomaba distancia de los demás. Hahn era extrovertido, amante de los deportes, de naturaleza amable con una actitud caballeresca bondadosa hacia las mujeres. Meitner tenía mucho tiempo libre después de asistir a las conferencias de Planck y estaba interesada en poder investigar. Hahn necesitaba un colaborador y pronto se pusieron de acuerdo en trabajar juntos.

Pero el profesor Fischer no podía aceptar sin objeciones una investigadora mujer en sus instalaciones. Meitner podía permanecer de favor en el cobertizo del sótano si prometía que nunca se dirigiría a las instalaciones de los niveles superiores donde se encontraban los estudiantes de sexo masculino. La relación de ella con Hahn era extremadamente formal y nunca almorzaban juntos. Siempre se veían en el cobertizo o los seminarios. Hahn ha descrito la situación así:

Nunca se habló de un trato más cercano fuera del laboratorio. Lise Meitner había tenido una educación estricta, como la de una dama, y era muy reservada debido a su timidez. Sin embargo, éramos buenos amigos.

Después de un par de años las costumbres dentro de la universidad se liberalizaron un poco y se le permitió a Lise Meitner abandonar el oscuro sótano y reunirse con los estudiantes de Fischer cuando ella lo deseara. En 1912 tuvo lugar un gran cambio: La creación del Instituto Kaiser-Wilhelm de química.⁽³⁾

Los primeros dos institutos Kaiser-Wilhelm (de física y química) se establecieron en Berlín, en el barrio de Dahlem, en las afueras al sudoeste de la ciudad. El verdadero nombre del instituto de química era Instituto Kaiser-Wilhelm de química física y electroquímica, y su primer rector (desde 1911, es decir, antes de que fuera inaugurado formalmente por el emperador) fue *Fritz Haber* (1868–1934). Él era conocido por el método “Haber–Bosch” para producir amoníaco con nitrógeno del aire, que le valió el premio Nobel de química de 1918, un premio controvertido teniendo en cuenta los aportes de Haber a las armas químicas durante la I Guerra Mundial.

Hahn y Meitner se mudaron en 1912 al Instituto Kaiser-Wilhelm de química y una de las primeras tareas de Hahn fue organizar una demostración adecuada para el emperador con motivo de la inauguración. Colocó un preparado de mesotorio (es decir, radio-228) sobre una tela de terciopelo para mostrarle al emperador la fluorescencia que la radiación generaba. En relación a la intensidad de la radiación, comparado con el preparado de 0,3 gramos de radio “común” (es decir, radio-226), se trataba de un preparado muy fuerte. Cinco años después dijo Hahn: “Si hiciera lo mismo hoy, terminaría en la cárcel.”

La guerra oscureció al mundo. En la actualidad son muchos los que consideran la insensatez de la guerra, y lo que es definido como homicidio y asesinato cuando lo comete una persona es el mismo asesinato que el cometido en virtud de las diferencias existentes entre los estados. Debemos comprender que la situación era diferente en 1914. Los padres, los maestros, el teatro, la literatura y los periódicos contribuían a subrayar el significado de la patria y la gloria de defenderla (aún cuando esto se realizara mediante ataques). Muchos cometieron acciones de amor a la patria y en honor al sentido del deber, algo que en los marcos existentes en la actualidad vemos como incomprensibles o criminales. Pero todavía vemos películas del salvaje oeste donde el héroe deja a su amada desesperada ya que “a man’s gotta do what a man’s gotta do...” (“un hombre debe hacer lo que debe hacer”)

Llegó la guerra y los héroes murieron en muertes sin sentido. Los jóvenes colaboradores de

(3) En 1911, Wilhelm II fundó el “Kaiser-Wilhelm-Gesellschaft” con el objeto de conducir una cantidad de institutos de investigación (que en 1914 ascendían a siete). Los dos primeros institutos “Kaiser-Wilhelm” (de física y química) fueron inaugurados en 1912. Las actividades se suspendieron después de la II Guerra Mundial, pero en 1948 fueron reemplazados por el “Max-Planck-Gesellschaft”, fundado en Göttingen, con Otto Hahn como su primer presidente. La sociedad Max-Planck conduce el equivalente del “Max-Planck-Institut” para investigación, mientras que los institutos de física y química física se encuentran en Göttingen.

Rutherford partieron a cumplir sus tareas militares y Niels Bohr — que al desatarse la guerra recorrió a pie el trecho que lo separaba de Alemania junto con su hermano — tuvo apuro en ir a casa y continuó con su esposa hasta Manchester para asistir a Rutherford. El joven Henry Moseley se encontraba en Australia de visita en la casa de su madre y la pasión patriótica lo llevó a regresar para ofrecerse como voluntario. Al año siguiente fue enviado a Gallipoli. En el camino, en Alejandría, el 27 de junio de 1915, escribió su testamento y decidió que todo lo que poseía, 2 200 libras, lo entregaba a la Royal Society “para ser utilizado como apoyo a la investigación experimental en patología, física, fisiología, química y otras ramas de la ciencia pero no en la matemática pura, astronomía u otras ciencias que solo tienen por objeto la descripción, la catalogación y la sistematización”.

Las fuerzas británicas ya habían comenzado en abril la invasión a Turquía mediante el desembarco en la península de Gallipoli, y Moseley participó en uno de los grupos de desembarco posteriores y, al igual que el resto, debió cavar y atrincherarse en las trincheras. Los turcos atacaron al amanecer del 10 de agosto y según la descripción del poeta *John Masefield* (1878—1967), que sobrevivió al ataque por ser miembro de la Cruz Roja, fue una lucha “cuerpo a cuerpo, con cuchillos, piedras y dientes, una lucha de animales salvajes”. En esa lucha murió Henry Moseley.

Los químicos del Instituto Kaiser-Wilhelm de química se dedicaron a la guerra a su manera: con sustancias químicas. Fritz Haber, que ya no era el jefe del instituto pues había sido convocado al servicio militar con el grado de capitán (cargo inusual para un civil), recibió la orden de crear una unidad para la guerra con gas. Otto Hahn, también convocado, fue teniente de reserva y se le ordenó que encontrara a Haber. Hahn estaba indignado por lo que escuchaba, pero Haber intentó defender la tarea. Hahn dijo (según Richard Rhodes):

Me explicó que la única manera de ganar el Frente Occidental, donde todos se habían atrincherado, era con la ayuda de nuevas armas. Una de las armas que se pensaba utilizar era el gas tóxico. [...] Cuando afirmé que estas armas violaban la Convención de la Haya, me dijo que los franceses ya habían empezado a utilizar munición rellena con gas, aunque sin grandes resultados. Además era la única manera de salvar incontables vidas si eso significaba que la guerra finalizar

En este trabajo participaron numerosos químicos industriales en lo que luego serían las fábricas I.G. Farben de Leverkusen. I.G. Farben fue creada en 1925 como un cartel de una cantidad de compañías químicas a las que el químico e industrial alemán *Karl Duisberg* (1861—1935) convenció para que colaborasen. En su carácter de jefe, Duisberg fundó en 1863 la firma de productos químicos y medicinales Bayer AG en Leverkusen (la firma tuvo gran éxito al comercializar la aspirina). En 1904 logró la cooperación entre BASF (Badische Anilin- und Sodafabrik, que había desarrollado el método Haber—Bosch para la producción de amoníaco), Agfa y Bayer.

En Leverkusen se fabricaron cantidades de sustancias tóxicas que fueron enviadas al Instituto Kaiser-Wilhelm de química en Berlín-Dahlem para continuar los estudios. Allí se vieron obligados a construir instalaciones especiales de depósito y un local de enseñanza donde Otto Hahn enseñaba la técnica de protección ante esos gases.

El 22 de abril de 1915 se utilizaron estos gases de manera sorpresiva en Yperen, en Bélgica. Se trataba de gas de cloro que mató a miles de soldados y dañó a otras decenas de miles. El “exitoso” resultado produjo una carrera armamentista en la producción de gases tóxicos. Se comenzaron a utilizar gas lacrimógeno, fosgeno, gas mostaza y hasta polvo de arsénico. Los alemanes cargaban granadas con cianhídrico, pero era poco efectivo. En octubre de 1918, antes

de que finalizara la I Guerra Mundial, nuevamente en Yperen, un cabo alemán fue herido en un ataque con gas. Se llamaba Adolf Hitler. Si esto no hubiera sucedido, quizá la historia mundial habría tenido otro desarrollo.

Otto Hahn tenía grandes dudas. Fritz Haber probablemente menos.⁽⁴⁾ La esposa de Haber, *Clara Immewahr Haber* (1870—1915), también era química, con un doctorado de la universidad de Breslau. Ella tenía muchas dudas y exigió que su esposo abandonara el trabajo con los gases de combate. Él respondió que un hombre de ciencia pertenece al mundo en épocas de paz, pero su país estaba en guerra. Fue demasiado para Clara. La noche siguiente se quitó la vida.

Después de que los alemanes comenzaran a utilizar el gas mostaza en julio de 1917, comenzó en EE.UU. un amplio programa de investigación de los gases de combate con un contrato de investigación con un número de universidades, entre ellas las de Cornell, Johns Hopkins, Harvard, MIT, Princeton y Yale. Se construyó una fábrica de gases de combate en Maryland, cuyo costo fue de 35,5 millones de dólares, para producir gas de cloro, fosgeno, gas mostaza y otras sustancias tóxicas. Allí trabajaron diez mil personas, y al final de la guerra tenía una capacidad increíble. Si la guerra no hubiese terminado en noviembre de 1918, se habría producido una enorme catástrofe.

Sin embargo, no todos los esfuerzos estaban orientados hacia armas más mortíferas. Eve Curie escribió: “Madame Curie ha previsto que la guerra será prolongada, que en gran medida será necesario operar a los heridos en el mismo campo de batalla y que los cirujanos y los médicos radiólogos debían estar constantemente a disposición en las ambulancias que estuvieran en el frente de batalla. Ella ha previsto la apremiante necesidad de la fabricación intensiva de aparatos de rayos X y que los automóviles con equipos de rayos X van a demostrar ser de invaluable ayuda.” Eve continuó:

Un telegrama, un llamado telefónico y se le comunica a Madame Curie que uno de los hospitales de campo está repleto de heridos con urgente necesidad de un coche con equipo de rayos X. Ella parte inmediatamente con su equipo y verifica que éste y la dínamo estén en orden y luego de que su chofer militar llena el tanque con gasolina, ella se pone rápidamente su abrigo oscuro y el sombrero de fieltro redondo, que ya había perdido su color y su forma, y recoge su valija resquebrajada de cuero amarillo. Ocupa el asiento delantero junto al chofer, expuesta al viento y el frío, y pronto su coche parte a toda velocidad en dirección a Amiens, Ypres o Verdun. Después de una parada y negociaciones con guardias suspicaces, se dirige al hospital de campaña. ¡Manos a la obra! Madame Curie escoge rápidamente una habitación del hospital que sea adecuada para la sala de rayos X. Junta las diferentes partes del equipo y lo arma. Conecta un cable del aparato a la dínamo que está en su coche. Una señal al chofer y la dínamo se pone en marcha. Marie controla la intensidad de la corriente. Antes de comenzar a examinar a los heridos, prepara la pantalla, pone los guantes y anteojos de protección al alcance, al igual que las tizas para marcar. Ahora hay una oscuridad total en la habitación, después de colgar cortinas negras de las ventanas que ella ha traído consigo, o, en caso de emergencia, algunas mantas de hospital. A un costado se improvisa un cuarto oscuro, donde las placas son reveladas en sus “baños”. Media hora después del arribo de Marie, todo está listo.

(4) Por sus aportes a la producción de amoníaco, Haber obtuvo el premio Nobel de química en 1918 (entregado en 1919). El hecho despertó algunas protestas debido al vínculo que tuvo con el gas tóxico durante la guerra, pero su institución volvió a ser reconocida como un centro internacional de la investigación química en la década de 1920. Dejó el Instituto Kaiser-Wilhelm en 1933, después de negarse a despedir a empleados judíos y se trasladó al laboratorio Cavendish. A su muerte el Instituto Kaiser Wilhelm realizó un acto de conmemoración a pesar de la oposición de los nazis.

La larga y lúgubre hilera de heridos comienza a ingresar. El cirujano se encierra con madame Curie en el cuarto oscuro, que se llena de un murmullo místico proveniente de los aparatos que están en marcha. Una tras otra ingresan las camillas con gente mutilada que sufre. La gente es colocada en la mesa de rayos X. Marie dirige el aparato hacia las partes del cuerpo laceradas para tener una clara imagen. El esqueleto y la silueta de los órganos internos aparece y a veces un objeto oscuro, opaco: la bala, la esquirla de la granada.

[...]

Además de los veinte coches que Marie ha equipado, ella ha [...] logrado crear 200 instalaciones de rayos X fijas. La cantidad de heridos examinados con las doscientas instalaciones de rayos X fijas o ambulatorias supera el millón.

La utilización de la radiación X aumentó fuertemente durante la I Guerra Mundial. Todas las partes se vieron obligadas a utilizar equipos primitivos que salvaron la vida de muchos mediante la localización de balas y esquirlas que facilitaron la realización de difíciles operaciones. La radioprotección era a menudo inexistente y después del final de la guerra las lesiones causadas por la radiación comenzaron a notarse y fueron dadas a conocer. Esto estableció las bases del trabajo internacional de radioprotección.

12 | John Berg, Radiohemmet,
Forssell y Sievert

Ya conocimos a los pioneros de los rayos X Sjögren y Stenbeck, y hemos visto que el joven Gösta Forssell asistió a Stenbeck en su instituto de radioterapia en la calle Mäster Samuelsgatan 63 a comienzos de siglo. Sin embargo, el mérito de haber puesto en marcha la actividad radiológica bien organizada en Estocolmo debe ser atribuido a un cirujano, *John Berg* (1851—1931). El “Padre Berg” fue, según la enciclopedia *Nationalencyklopedin*, “un exitoso médico, pionero en el campo de la asepsia y la cirugía en Suecia, que realizó grandes aportes de carácter organizativo en la asistencia médico-sanitaria”. Uno de esos aportes fue la creación de la Radiohemmet (La Casa del Radio).

Las fotografías de Berg de 1910 muestran a un hombre vigoroso con barba blanca, parecido al rey Oscar II. Berg había descubierto a comienzos de siglo que la posibilidad de curar el cáncer no había avanzado, a pesar de los progresos de la cirugía y las operaciones cada vez más drásticas. Sin embargo, los progresos de Sjögren y Stenbeck habían demostrado que la radiación X podía ser efectiva y se hablaba también de utilizar la radiación gamma del radio, el nuevo elemento que todavía parecía poseer propiedades místicas.

A propuesta de Berg, la Sociedad Médica de Suecia (Svenska läkaresällskapet) que pronto cumpliría 100 años de existencia, envió un cuestionario a todos los médicos suecos solicitando información acerca de los paciente con cáncer examinados durante un período de tres meses. El 97% de los médicos participó en esta encuesta. Las respuestas fueron analizadas durante 1906 por un comité especial y se presentó un informe en una reunión de la Sociedad en 1907. El informe fue publicado en 1909 en alemán en *Zeitschrift d. Krebsforschung* bajo el elocuente título germano “Bericht über die von der schwedischen Ärztgesellschaft veranstaltete Sammelforschung über die Krebskrankheit in Schweden während der Zeit vom 1. Dezember 1905 bis 28. Februar 1906. Erstattet von dem Krebsforschungskomitee der Gesellschaft.” (Nota del traductor: en alemán en el original).

Según Moritz Simon, el hospital Serafimer ya contaba en 1901 con un aparato de rayos X. *Elis Berven* (1885—1966), jefe de la Radiohemmet 1927—1950, afirmó sin embargo que el primer laboratorio se estableció en 1903. *Åke Åkerlund* (1887—1958), conocido jefe del departamento de radiodiagnóstico del hospital Karolinska, 1941—1952, indicó que Berg creó un laboratorio de rayos X en 1905 en el hospital Serafimer en relación con la actividad quirúrgica. Los datos no son necesariamente contradictorios.

El 1 de julio de 1906 Gösta Forssell fue empleado como jefe del laboratorio de rayos X. *Lars Edling* (1878—1962), profesor de radiología de Lund, escribió en el diccionario enciclopédico sueco *Svensk Uppslagsbok* acerca de la actividad de Forssell:

El instituto de rayos X del hospital Serafimer, un instituto modelo equipado con aparatos genialmente contruidos por Forssell. Aquí él ha llevado a cabo un trabajo de investigación intensivo, especialmente en el campo de la anatomía y fisiología del tubo digestivo. Su trabajo acerca de los movimientos de las membranas intestinales durante el trabajo de digestión ha sido innovador. Entre los numerosos estudios valiosos realizados por Forssell se observa un trabajo juvenil notable acerca de los movimientos de la muñeca y una tesis sobre la radiología del sistema óseo y los órganos del aparato urinario.

Es necesario mencionar algo respecto de los antecedentes de Gösta Forssell. Hay dos conocidas familias “Fors(s)ell”, y en la época de Gösta Forssell cada una de ellas contaba con conocidos representantes: *John Forsell* (1868—1941), el temperamental cantante de ópera, y Gösta Forssell, “el padre de la radiología sueca”. La familia de John Forsell tiene sus orígenes en

Västergötland, mientras que la familia de Gösta proviene de Järvsö, en Hälsingland. El padre de Gösta, el director intendente *Abraham Forssell*, tuvo cuatro hijos que fueron lo suficientemente exitosos como para ser nombrados en las enciclopedias suecas: *Carl Forssell* (1881—1973) fue profesor de estadística de la construcción en KTH. *Gerhard Forssell* (1882—1964) fue profesor de cirugía de la Escuela Superior de Veterinaria. *Arne Forssell* (1887—1974) fue archivero de la ciudad de Estocolmo y padre del escritor *Lars Forssell* (1928—). Gösta era el mayor de los hermanos: había nacido en 1876.

Fue en 1902 cuando el ingeniero Bror Edvard Järnh se hizo cargo de la empresa John Anderssons Elektro-Tekn. Byrå. La razón social de la empresa fue cambiada por “John Anderssons Elektro-Tekn. Byrås Eftr.”, y Järnh amplió las actividades para que comprendieran también instalaciones de energía e iluminación eléctrica. El mayor interés en los equipos de rayos X hizo que los médicos suecos le pidieran a Järnh que los importara y tomara contacto directo con fabricantes extranjeros. Así comenzó la colaboración entre la industria radiológica y los radiólogos suecos, para beneficio de ambos.

Particularmente fructífera fue la colaboración entre Järnh y Gösta Forssell, el cual tenía numerosas sugerencias de nuevas construcciones de equipos técnicos, entre ellos el famoso soporte para radioscopia y una caja para examinación de placas röntgen. Durante una cena en casa del hospitalario Järnh, discutieron la necesidad de una sociedad en la que los radiólogos pudieran intercambiar experiencias. Esto llevó a que seis radiólogos fundaran en 1907 la Sociedad Sueca Radiológica (Svenska Radiologiska Föreningen). Los seis eran, además de Forssell, los radiólogos *Fredrik von Bergen* (1877—1951), quien luego sería jefe de servicio del hospital Sahlgrenska de Gotemburgo; Ivar Bagge; *Patrik Haglund* (1870—1937) director de gimnasia y radiólogo ortopédico, que llegaría a ser profesor en el Instituto Karolinska; *G. Holm*, del que desconozco otros datos y Tage Sjögren.

Se sabe muy poco sobre las actividades de esta asociación, excepto que los señores Bagge, Forssell y Sjögren elaboraron una lista con aranceles propuestos para las distintas tareas:

Radioscopia	20 coronas
Fotografía de mano o pie	5 coronas
Röntgen de pelvis	30 coronas
Cálculos	40 coronas

En la primavera de 1908 Gösta Forssell fue convocado al palacio real a solicitud de la reina Victoria. Su madre, la archiduquesa Louise av Baden había escuchado que el radio se había utilizado con éxito en el tratamiento del cáncer. La reina quería ver esos métodos de tratamiento en Suecia. Forssell no era un desconocido en el palacio: ya le habían ofrecido ser maestro del príncipe Erik, el hijo menor de Victoria (1889—1918), pero rechazó el cargo. La reina le proponía ahora que junto con John Berg realizaran un viaje para estudiar los nuevos tratamientos y se ofreció a pagar los costos del viaje. De ese modo se introdujo la radioterapia en Suecia, como complemento del tratamiento con rayos X.

Más dinámica que la Sociedad Sueca Radiológica fue la organización que el entusiasta John Berg creó en su campaña contra el cáncer. El 7 de mayo de 1910 se constituyó la Asociación Sueca contra el Cáncer (Svenska cancerföreningen). La intención era que esta organización continuara el trabajo del comité contra el cáncer de la Asociación Médica, cuyo informe se publicó en 1909. Berg formuló los principios que asumiría la asociación y eran los siguientes:

1. Medidas prácticas humanitarias para mejorar el tratamiento y la asistencia de los pacientes con cáncer;
2. Colaboración con médicos privados en su investigación estadística;
3. Ayuda económica para publicaciones científicas y de divulgación acerca del problema del cáncer;
4. Estudios detallados y utilización de los estudios en curso sobre el cáncer en otras partes del mundo.

La Asociación Sueca contra el Cáncer se incorporó de inmediato a la International Association for Cancer Research. En un congreso sobre el cáncer realizado en París en octubre de 1910 participaron en representación de Suecia Berg, Forssell y *Gunnar Nyström* (1877—1964), secretario de la Asociación contra el Cáncer⁽¹⁾ y luego profesor de cirugía en Uppsala. Cada vez quedaba más claro que la radioterapia completaría y en muchos casos reemplazaría a la cirugía en el tratamiento contra esta enfermedad.

Después de que la sucesión testamentaria de C.F. Liljevalch donara 20 000 coronas para ese propósito, la Asociación contra el Cáncer comenzó un proyecto de investigación estadístico. Se envió un cuestionario a 1300 médicos de los cuales no menos de 1243 lo contestaron. Cuando el proyecto continuó, disminuyó el interés: En 1912 contestaron 1018 médicos pero en 1913 tan solo 432. Las respuestas fueron procesadas por Gunnar Nyström, que sin embargo publicó el resultado recién en 1922.

El 2 de junio de 1910, apenas un mes después de que se creara la organización madre, se creó una seccional de la Asociación contra el Cáncer para Estocolmo y sus alrededores. La presidió John Berg y el secretario fue Gösta Forssell. Con tan poderosa conducción, la seccional de Estocolmo tomó casi toda la iniciativa. La organización madre se reunió unas pocas veces hasta 1919, año en que se disolvió y la seccional de Estocolmo asumió sus tareas bajo el nombre de Asociación contra el Cáncer de Estocolmo. Por cuestiones de sencillez, pasó luego a llamarse "Asociación contra el Cáncer" (Cancerföreningen).

Tanto Berg como Forssell comprendieron las posibilidades de la radioterapia, pero también que eso exigiría mayores recursos que los disponibles en el hospital Serafimer. Por ello, en 1909 Berg, junto con dos amigos, invirtió 40000 coronas para intentar establecer un instituto especial de radioterapia. Con tal objeto alquiló en abril de 1910 dos pisos en la calle Scheelegatan 10, en Kungsholmen en Estocolmo, casi enfrente del edificio municipal. El nuevo instituto contaba con 8 habitaciones con 16 camas, 6 para hombres y 10 para mujeres. Había un aparato de rayos X y 120 miligramos de radio que habían sido adquiridos gracias a donaciones privadas. El radio estaba distribuido en 11 preparados.

El nuevo instituto abrió sus puertas el 1 de agosto de 1910 y recibió el nombre de "Radiohemmet" (La Casa del Radio). El nombre fue elegido, según Berven, para "dar la impresión de que los pacientes se encontraban en una casa donde su enfermedad sería considerada con simpatía y comprensión". Los primeros médicos contratados fueron Forssell, Berven y el ginecólogo *James Heyman* (1882—1956). Forssell continuó como jefe de la Radiohemmet hasta 1927, fecha en que Berven lo sucedió en el cargo. En 1911 se entregó Radiohemmet a la Asociación contra el Cáncer de Estocolmo, que tuvo la responsabilidad de su funcionamiento hasta 1937.

La iniciativa y el dinero de Berg habían creado a Radiohemmet. Forssell, Berven y Heyman la hicieron famosa y la inspiración provino de Forssell. Mediante la cooperación con Forssell, la firma electrotécnica de Järnh se convirtió rápidamente en la primera empresa especializada

(1) Nota del Revisor: Asociación Sueca contra el Cáncer

en tecnología radiológica de Suecia. En 1917 la empresa se convirtió en sociedad anónima con la razón social “Järnhs Elektriska Aktiebolag”, cuyo gerente general fue Bror Edvard Järnh. Las actividades de la empresa tuvieron lugar entre 1914 y 1939 en Sundbyberg. En 1939 se levantó una nueva fábrica en la calle Industrivägen 23 en Hagalund.⁽²⁾

Hasta la I Guerra Mundial, Järnh vendía aparatos de rayos X importados, pero debido a los bloqueos durante la guerra, la importación era cada vez más difícil. Los radiólogos suecos convencieron a Järnh para que fabricara sus propios aparatos de rayos X, si bien el tubo de rayos X y la válvula se debían importar. Gracias a la colaboración con Gösta Forssell y Åke Åkerlund se fabricaron instrumentos ingeniosos y de buena calidad. Uno de los mayores éxitos de exportación de la década de 1920 fue un diafragma espiral construido por Åkerlund.

La actividad de la Radiohemmet en la calle Scheelegatan fue exitosa, y las constantes donaciones permitieron el crecimiento. Las instalaciones pronto fueron insuficientes. En 1913 recibió medio millón de coronas aportados por la ciudad de Estocolmo del Fondo Forsgrenska y otro medio millón de una colecta privada iniciada por la reina Victoria. En noviembre de 1916 se pudo mudar a un edificio que antes albergaba al Instituto de Comercio Frans Schartau. Eran dos inmuebles sobre la calle Fjällgatan en Södermalm. Uno de ellos contaba con locales para pacientes ambulatorios, sala de espera y sala de estudios y tratamiento. Las dos plantas superiores contaban con salas de atención médica para 34 pacientes y una sala de radioterapia. En el otro inmueble había un laboratorio de rayos X con cuatro aparatos en la planta baja, viviendas para las enfermeras y auxiliares en los dos pisos superiores. También contaba con cocina y oficinas en el subsuelo.

Radiohemmet estuvo en la calle Fjällgatan hasta 1937. Pronto se temió que las cantidades existentes de radio fueran insuficientes y que los equipos de rayos X fueran anticuados. En 1917 el parlamento le otorgó 200 000 coronas para la compra de radio y en 1919 otras 35 000 coronas para dos aparatos de rayos X. En 1917 Radiohemmet se dividió en dos departamentos: Un departamento general, cuyo jefe era Elis Berven, y un departamento ginecológico bajo la conducción de James Heyman.

El diagnóstico radiológico en la asistencia médico-sanitaria se desarrolló también rápidamente y surgió la necesidad de un foro de debate más efectivo que la no tan activa Asociación Sueca Radiológica desde 1907. Por ello, Gösta Forssell envió el 8 de mayo de 1919 una circular que decía lo siguiente:

Por la presente tengo el honor de invitarlo a usted a una asamblea para la formación de una Asociación Sueca de radiología. La reunión tendrá lugar el 17 de mayo en el departamento de rayos X del hospital Serafimer a las 19:00 en punto. Si en esta oportunidad desea exponer alguna opinión o demostrar interés por el tema, será muy bienvenido. Luego de la reunión tendrá lugar una cena. Los mensajes acerca de una eventual exposición de sus opiniones y su participación en la reunión y la cena deberían enviarse tan pronto como sea posible al Dr. E. Berven, Radiohemmet, Fjällgatan 23, Estocolmo.

Asistieron a esa reunión del 17 de mayo de 1919 alrededor de 23 personas además de los orga-

(2) Otra empresa que se dedicó a la fabricación de equipos de rayos X fue creada en 1924 por *Georg Schönander* (1894–1958) y tuvo un importante papel en el desarrollo tecnológico, gracias al así llamado *Lysholmsrastret*, una microrejilla para un diafragma secundario que ganó reconocimiento internacional después de 1928. Y entre los participantes del congreso de radiología en Estocolmo en 1928 se encontraban *Wilhelm y Gustav Weber*, padre e hijo, que representaban a “A.-B. Elema”, la empresa que luego ocuparía un lugar de liderazgo.

nizadores.⁽³⁾ Forssell fue electo presidente de la asamblea y Berven fue elegido secretario. Hubo acuerdo en fundar una asociación, que a propuesta de Forssell se llamó Asociación Sueca de Radiología Médica (Svensk Förening för Medicinsk Radiologi). La asociación fue principalmente científica y no hubo debates referidos a que la misma también tratara cuestiones gremiales (la asociación, sin embargo, envió un escrito en 1920 al entonces Comité Estatutario del Hospital acerca de las condiciones de empleo de los radiólogos). Forssell ya había redactado los estatutos que fueron aprobados en general. Luego Forssell fue elegido presidente, Berven secretario y Heyman tesorero. La cuota anual se estableció en 10 coronas. La asociación estaría abierta a médicos suecos, ingenieros y científicos que trabajaran en el desarrollo de la investigación radiológica.

La Asociación de Radiología (como se la llamaba coloquialmente) aprobó pronto una propuesta de Forssell de crear una publicación sobre radiología, sobre todo porque la guerra dificultaba la posibilidad de publicar artículos que se distribuyeran internacionalmente. La publicación incluiría artículos en inglés, francés o alemán y referencias a artículos importantes en otros medios tales como conferencias y debates en el seno de la Asociación de Radiología. En lo posible sería también un foro para los otros países nórdicos. La asociación aprobó su declaración de principios y luego Forssell logró asegurar suficiente ayuda económica y en 1921 entró en vigencia el *Acta radiologica* (nota del traductor: en latín en el original).

Cuando la Asociación de Radiología se fundó en 1919, todavía era difícil contactarse con los contactos internacionales debido a la guerra. Finlandia había declarado su independencia en 1917 y luego debió soportar una guerra civil. El contacto entre los radiólogos de Dinamarca, Noruega y Suecia fue más sencillo. En un congreso de cirugía en Gotemburgo en 1916, tres radiólogos nórdicos tuvieron posibilidad de debatir la cooperación nórdica: *S. A. Heyerdahl* del Hospital Nacional de Kristiania (el nombre que por entonces tenía la ciudad de Oslo), *H. J. Panner* del Hospital Nacional de Copenhague y Gösta Forssell. Hubo acuerdo respecto de la necesidad de una asociación nórdica pero resultaba difícil realizarlo durante la guerra.

El siguiente congreso de cirugía se realizó en Kristiania (Oslo) en 1919, y para entonces la guerra ya había finalizado. Los radiólogos noruegos (había solo ocho y algunos decían que eran siete) dudaban ante la responsabilidad que significaba la organización de una conferencia de radiólogos, pero estaba ansiosos. “¿Cómo van las cosas con la nueva asociación? Vamos a asistir en cuanto nos inviten. No es necesario que sea algo imponente” le escribió Forssell a los noruegos. Severin Heyerdahl (1870–1940), el principal radiólogo de Noruega, comentó (según Erik Poppe en la publicación editada con motivo del 60 aniversario de la Asociación de Radiología Nórdica):

No había cosas raras en la ciudad donde residíamos los radiólogos en Kristiania en 1919. Nuestro único instituto público de rayos X donde se enseñaba era el Instituto de Rayos X y Radio, del Hospital nacional, y aquí las condiciones eran “pauvres” (Nota del traductor: pobres, en francés en el original) para expresarlo de alguna manera. Los radiólogos en Kristiania en 1919 éramos solo cuatro pero razonábamos así: Uno es uno, dos son dos pero cuatro es una asociación. Superamos nuestras dudas y enviamos invitaciones a los radiólogos daneses, fineses y suecos y también a los tres radiólogos noruegos que residían fuera de Kristiania.

Ningún finés pudo llegar a Kristiania en 1919. Desde Suecia llegaron ocho participantes: Bagge, Berven, Edling, Forssell, Heyman, Simon, Ström y Åkerlund. Desde Dinamarca solo dos: *C I Baastrup* (1885–1950) y *J F Fischer* (1868–1922).

(3) Z.G. Asplund, I. Bagge, E. Berven, C. Carlström, E. Edberg, F. Edling, G. Forssell, N. Hansson, S. Hasse-Iroth, J. Heyman, B.E. Järnh, A. Karsten, T. Klason, H. Laurell, G. Lundgren, B. Lundquist, W. Moberg, G. Runström, J. Schauman, M. Simon, T. Sjögren, S. Ström, A. Troell, H. Waldenström y Å. Åkerlund.

La asociación fue fundada el 2 de julio de 1919 bajo el nombre de Asociación Nórdica de Radiología Médica. Heyerdahl fue su primer presidente, y se dispuso que de allí en más el presidente de la institución fuera el del país que organizara el congreso de la asociación. Los siguientes congresos radiológicos se realizaron en Copenhague en 1921 y en Estocolmo, en 1923.

En 1920 se constituyó la Asociación Noruega de Radiología Médica y el mismo año las de Finlandia y Dinamarca. Las dificultades con las divisas hicieron que los radiólogos fineses no pudieran participar en los primeros congresos nórdicos, pero en 1925 el congreso nórdico tuvo lugar en Helsinki.

Durante la década de 1920 apareció en escena otra persona importante: *Rolf Sievert* (1896—1966). El padre de Sievert, Max Sievert, era uno de tres hermanos (Max, Georg y Ernst) que a fines del siglo XIX emigraron desde Sachsen a Suecia. Su padre, *Heinrich Theodor Sievert* era pastelero en Zittau, una pequeña ciudad cerca de la frontera con la entonces Checoslovaquia. *Max Sievert* (1849—1913) fue representante de la empresa *Zentkers Maschinenfabrik* de Berlín. Consideró que existían buenas posibilidades de hacer negocios en los países escandinavos y se mudó a Estocolmo donde comenzó sus actividades en 1881 con una firma llamada *Max Sieverts Maskinaffär*. Obtuvo la ciudadanía sueca en 1885 y se casó en 1894 con *Sofia Carolina Pancheen*.

La introducción del teléfono en Suecia realizada por *Lars Magnus Ericssons* (1846—1926) exigía la importación costosa de productos y la empresa de Sievert era una de las importadoras. Ericsson le propuso a Sievert que fabricara esos productos y Sievert lo intentó. Esto llevó a que junto con su hermano menor *Ernst* (1863—1941), que llegó a Suecia en 1887, comenzaran la producción de cables en 1888. El tercer hermano, Georg, que también se trasladó a Suecia, colaboró en las actividades de intermediación de Max. La empresa de cables se convirtió en sociedad anónima en 1895 bajo la razón social *Max Sieverts Fabriks Aktiebolag*. El mismo año nació la hija *Lisa* y al año siguiente el hijo *Rolf*.

Max Sievert era un industrial con gran energía que parecía no tener demasiado tiempo para sus hijos. Sus fotografías muestran a un hombre poderoso y decidido, no diferente a Rolf cuando éste tuvo su misma edad. Sin embargo Lisa y Rolf parecen haber tenido una infancia tranquila, especialmente durante los veranos, en la mansión campestre junto al lago Vallentuna. Durante el invierno la familia Sievert vivía en la calle *Riddargatan 45* de Estocolmo.

Cuando Max Sievert murió, Rolf tenía solo 17 años y todavía no había finalizado sus estudios secundarios en la escuela *Nya Elementarskolan* en la calle *Slöjdgatan* detrás de *Hötorget*. Entre sus compañeros de estudios de 1914 estaban *Herbert Tingsten* (1896—1973), *Olof Svanberg* (1896—1975), quien luego sería profesor de química agrícola en Uppsala, el futuro general *Viking Tamm* (1896—1975), y *Guido Valentin* (1895—1952), conocido escritor, periodista y hombre de teatro. Las calificaciones de Rolf no eran brillantes, y la muerte del padre probablemente haya influido negativamente en ellas.

Después de obtenido el diploma, Rolf y su hermana Lisa fueron herederos de una gran fortuna pero no estaban interesados en seguir las huellas del padre. En su lugar él intentó hacer su propio camino. En el otoño de 1914 comenzó a estudiar la carrera de medicina en el Instituto *Karolinska* pero pronto se cansó. Como estaba interesado en la tecnología, intento ingresar en la Real Escuela Superior Técnica (KTH), pero sus calificaciones no eran suficientes y se vio obligado a realizar exámenes complementarios de matemática, física y química. Los aprobó e ingresó en la sección *Electrotécnica* de la escuela KTH en el otoño de 1915. Quizá esperaba que todo fuera sencillo, pero el ritmo de los estudios en KTH era intenso y exigente y Rolf se cansó después de tan solo algunos meses. Él esperaba que la vida estudiantil de Uppsala fuera menos

exigente y se dirigió allí para estudiar una licenciatura. Lo logró en 1919 en las materias Astronomía, Meteorología matemática y mecánica.

Tras la licenciatura, Rolf Sievert regresó a Estocolmo y vivió en Lärkstaden. Realizó diversos experimentos en su propio laboratorio en el sótano, donde recibió la visita de, entre otros, el joven físico y luego colaborador, Sven Benner. Rolf había decidido continuar sus estudios en la Escuela Superior de Estocolmo con el objeto de obtener una licenciatura en física.

Al mismo tiempo era miembro suplente del directorio de “Sieverts kabelverk”, como solía llamarse a la empresa, pero parece ser que no estaba muy interesado en las actividades de la compañía. Durante el período 1926—1928 fue miembro ordinario del directorio pero en 1928 tanto él como su hermana vendieron a los demás accionistas las 1000 acciones que poseían. Ernst Sievert poseía 1824 acciones de las 2400 y el mismo año decidió que la empresa pasara a manos de L.M. Ericsson.

En 1919 encontramos a Rolf Sievert trabajando durante sus estudios como asistente del catedrático *Tycho Aurén* en el Instituto Nobel de Física.⁽⁴⁾ Aurén, que era catedrático del Seminario Superior Docente del Estado, realizaba investigaciones y estudiaba la absorción de rayos X. En el Instituto Nobel, Sievert fue contactado por el médico de la Radiohemmet, *Gunnar Lundgren*, acerca de una cuestión que marcaría su futuro. Lundgren sería luego jefe de servicio de la sala de rayos X del hospital de Danderyd. Después de la muerte de Sievert, le escribí a Lundgren y le pregunté si recordaba el encuentro. Me respondió lo siguiente en una tarjeta postal:

Con relación a Rolf Sievert, recuerdo que mi jefe en Radiohemmet, el profesor Gösta Forssell, no había podido encontrar a un físico que quisiera o pudiera dedicarse al cálculo de la dosis radioactiva. En alguna oportunidad escuché que alguien mencionó a Rolf Sievert, quien estudiaba en el Instituto Nobel, pero no recuerdo quién me lo dijo. Contacté a Forssell, que me pidió que hablara con Sievert y evaluara si era la persona adecuada. Tuve una muy buena impresión de él y le pedí que visitara a Forssell. Sievert fue empleado de inmediato. Fue muy fácil ya que la parte económica no era importante para él.

Una grabación de una conferencia de Sievert en su Institución de Radiofísica en 1964 nos permite recordar sus impresiones:

En 1919 yo era asistente del académico Aurén, que trabajaba en el Instituto Nobel en la absorción de rayos X. Allí fue el doctor Lundgren que trabajaba en la Radiohemmet y expresó su necesidad de contar con físicos y que no había logrado conseguir a ninguno. Este fue el origen de la cuestión que hizo que me interesara en estos temas. Después, en 1920, estaba de viaje en EE. UU. donde me encontré con Forssell. Viajamos juntos y vimos dispositivos para la producción de preparados y también instalaciones radioterapéuticas y me convenció aún más de realizar este trabajo.

Acerca del mismo encuentro, Forssell cuenta (en inglés) al cumplir Sievert 50 años de edad (véase la referencia):

Me encontré por primera vez con Rolf Sievert durante un viaje de estudios a los EE.UU. en el verano de 1920. Él estaba allí para tener una vista general de los últimos avances de la física en ese país y yo revoloteaba como una abeja de flor en flor en el jardín radiológico del nuevo mundo. Él estaba muy impresionado por las posibilidades de desarrollo de la física de radiación y yo,

(4) Así se denominaba a veces el Instituto de Investigación de física de la Academia de Ciencias, que luego sería el Instituto Manne Siegbahn, en Frescati, al norte de Estocolmo.

por mi parte, por el significado de la colaboración en la radiología médica. Nuestros caminos se cruzaron en Schenectady, el baluarte de la tecnología radiológica en EE.UU. Allí, en una habitación de hotel bien alto entre las estrellas, estuvimos sentados toda una noche comparando nuestras observaciones y planes y establecimos las bases de una amistad y camaradería al servicio de la radiología que desde entonces ha perdurado.

[...]

En "Radiohemmet" solo teníamos acceso a una pequeña habitación para el trabajo de control físico,⁽⁵⁾ pero Sievert puso su propio laboratorio físico privado a disposición de Radiohemmet para el trabajo de investigación radiofísico. Radiohemmet tuvo durante 4 años, según el informe anual de la Asociación contra el Cáncer, "el beneficio de una cooperación voluntaria y sin pago alguno" con este radiofísico "que contribuyó a la institución con el control de la dosificación de rayos X y para este objetivo construyó instrumentos muy valiosos" y también realizó investigaciones acerca de los problemas con las dosis. En 1923 la Sociedad contra el Cáncer de Estocolmo resolvió la ampliación de la Radiohemmet con un edificio que, además de un laboratorio para anatomía patológica, una biblioteca y un museo, comprendería una pequeña sala de radiofísica médica⁽⁶⁾ Esta sala se inauguró el 5 de julio de 1924. Sievert hizo milagros para conseguir "donantes anónimos" que aportaron 30000 coronas "como contribución para el mantenimiento y gastos de la institución de física durante los próximos 5 años, con la condición de que la Asociación contra el Cáncer aportara medios para un equipamiento completo de la institución y también garantizara el cuidado y mantenimiento de este equipamiento durante un período de 5 años".

Otra contribución para la investigación en Radiohemmet fue la realizada por el patólogo *Olle Reuterwall* (1888–1956), que fue empleado en 1921 y llegó a ser jefe de un departamento patológico especial en 1923. Reuterwall fue luego jefe de la institución radiopatológica especial que fue creada en 1937. También fue profesor de radiopatología del Instituto Karolinska en 1941.

Desde el 1 de julio de 1924 Sievert fue empleado como "jefe del laboratorio físico de Radiohemmet", renunció a su sueldo siempre y aportó mucho más para la actividad investigativa del laboratorio.

Así recordaba Sievert el encuentro con Forssell y los primeros tiempos en la Radiohemmet. El texto está extraído directamente de la conferencia que brindó en 1964 y comienza con lo sucedido en los Estados Unidos:

Ya entonces le señalé a Forssell que la colaboración entre los estudiantes de medicina y los físicos era inevitablemente necesaria. En realidad era insolente. Yo era un mocoso entonces pero sostenía firmemente que el físico debía estar junto al estudiante de medicina como consultor y no como subordinado de esos estudiantes. Creo que ha sido un principio que he tratado de sostener durante todos estos años y creo que es un principio importante.

En 1920 realizamos algunos trabajos para aclarar la cuestión de las dosis en torno al preparado de radio. Utilizamos mucho un método que consistía en aplicar el preparado de radio en esa masa plástica que era muy blanda a 70°—80° y que se endurecía a la temperatura corporal. Y allí se colocaba el preparado y se realizaba la irradiación, que era lo más pareja posible sobre la parte

(5) El primer local que Sievert tuvo a su disposición en Radiohemmet fue una habitación tabicada de 5 m² para el laboratorio fotográfico.

(6) El laboratorio físico tuvo durante el período 1924–1929 una superficie total de aproximadamente 50 m² y estaba compuesto por un laboratorio de rayos X que ocupó la mayor parte del mismo, un pequeño cuarto oscuro y una habitación de aproximadamente 10 m² que era a la vez habitación escritorio y laboratorio para la medición de preparados de radio.

enferma, sobre el tumor. También se procedía así en el tratamiento ginecológico. En esos casos se introducía en la zona genital preparados de diferentes tamaños. En este tratamiento superficial con sustancias radioactivas no había ninguna dosificación, en realidad no existía ningún principio de dosificación. Se solía hablar de miligramo hora, pero en realidad se hacía instintivamente. Y el único que realmente podía hacer cosas extraordinarias allí era el profesor Berven.

Entonces construimos un instrumento para poder medir las dosis. [...] en ese entonces aparece en escena mi primer colaborador, Paul Haglund,⁽⁷⁾ que realizó investigaciones en el laboratorio que habíamos conseguido en la Radiohemmet. El laboratorio medía 5 m². Se sentaba allí con perseverancia, día y noche, midiendo las sustancias radioactivas. Debe haber recibido mucha radiación sobre su cuerpo, pero parece que no lo afectó.

En una oportunidad, cuando Berven quería dar la misma dosis sobre la superficie, él logró que la dieran. Era, desde luego, su experiencia ante la reacción de la piel y la experiencia acumulada, ya que lo había hecho muchas veces por sí mismo y había observado muchos resultados. Era absolutamente asombroso como daba las dosis correctas, o sea, las dosis iguales donde quería iguales dosis. Era impresionante. Esa fue, seguramente, una de las razones por la que los resultados de la Radiohemmet fueron significativamente buenos desde sus inicios.

La primera aparición de Sievert en la radiofísica tuvo lugar en una reunión de la Asociación de Radiología en el hospital de Lund el 2 de octubre de 1920. Al respecto escribió el radiólogo de Linköping *Torbern Klason* (1889–1979) en su relato histórico de esta asociación: “de la zona de tratamiento debemos recordar una conferencia brindada por el joven físico Sievert, por ese entonces delgado, acerca de la *Producción de preparados radiactivos para propósitos médicos mediante la concentración de emanación de radio*.” La conferencia, publicada en *Acta radiologica* en 1920, la primera publicación de Sievert, estaba inspirada en su visita a Failla en New York. La alusión de Klason al aumento de peso del cuerpo de Sievert con los años es solo una entre muchas. Una popular anécdota menciona una cena en la que uno de los oradores homenajeados, el profesor *Gustaf Ising* (1883–1960), comenzó su discurso diciendo “Rolf Sievert, al igual que el rey Gustaf II Adolf, con los años...”, luego hizo una pausa retórica mientras todos miraban de reojo a Sievert, y continuó “... iestuvo rodeado de buenos colaboradores!”

La primera gran tarea de Sievert fue describir física y matemáticamente la distribución de la dosis de preparado de radio que se colocaba al paciente para el tratamiento superficial tumoral. Para el cálculo de las dosis de radiación era necesaria una evaluación de una integral que no podía valorarse aritméticamente sino que debía estimarse gráficamente. Se la denominó *Integral de Sievert*.⁽⁸⁾ En su primer ensayo sobre la distribución de la intensidad de la radiación gamma en torno al preparado de radio de diferente forma geométrica (*Acta radiol.* 1 [1921], pág. 89–128) Sievert da una tabla sobre esta integral. Hay tablas más amplias en su tesis doctoral de 1932. La evaluación de la integral de Sievert “fue un punto de inflexión para la dosimetría teórica”, afirmó Richard Mould en su trabajo *A Century of X-rays and Radioactivity in Medicine*.

En su tesis Sievert había discutido las diferencias entre sus propios resultados y los publicados por los físicos alemanes *Walter Friedrich* (1889–1979) y Otto Glasser. Esto provocó un intercambio de opiniones en las que Glasser afirmaba que Sievert había utilizado algunas fórmulas que el mismo Glasser utilizó en su tesis doctoral en 1919, una tesis a la que Sievert no había tenido acceso. Sin embargo, la impresión es que Sievert exponía argumentos más fuertes en el intercambio epistolar.

(7) El primer colaborador de Sievert, *Paul Haglund*, fue empleado en 1923 y todavía trabajaba y estaba presente cuando Sievert dio su conferencia en 1964.

(8) Para los interesados, la forma de la integral es $fe^{-a/\cos\theta}d\theta$

En 1923 Sievert publicó un interesante trabajo sobre la radiación secundaria beta y gamma (*Acta radiol.* **2**, pág. 268—300). Luego se dedicó cada vez menos a los estudios teóricos y más al trabajo práctico con construcciones de instrumentos y mediciones de radiación. Durante 1926 tuvo varias ideas interesantes.

En una tesis cuyo traducción en sueco dice “Un dispositivo simple, confiable, para medir dosis profundas” Sievert describió por primera vez el principio de la *cámara condensador* (*Acta radiol.* **5** [1926], pág. 468—470). Hasta entonces todas las mediciones de la capacidad de la radiación röntgen y gamma para ionizar el aire se habían realizado con instrumentos torpes. Estaban compuestos por una *cámara de ionización* en la cual un volumen de aire irradiado se convertía en conductor eléctrico, y por un instrumento de medición para registrar la corriente eléctrica o carga que se pudiera transportar a través de la cámara como consecuencia de la irradiación. Para las mediciones de pacientes en radioterapia la cámara de ionización debía estar conectada al instrumento de medición mediante un cable largo para que éste pudiera ser colocado en un lugar protegido.

La idea de Sievert era integrar la cámara de ionización y un condensador en lugar de un instrumento de medición. La cámara de ionización y el condensador podían entonces constituir una unidad que no necesitaba ningún cable para conectarse. Antes de la medición se podía suministrar al condensador una carga eléctrica, a partir de la cual se podía medir la tensión sobre el condensador. Cuando la cámara de ionización durante la radiación se convertía en conductora eléctrica, parte de la carga del condensador se perdía. Después de la irradiación se podía constatar en qué medida se había descargado el condensador mediante la provisión de un electrómetro y comprobar la tensión eléctrica restante. La modificación de tensión que reflejaba la pérdida de carga daba una medida de la dosis de radiación.

La construcción era simple pero genial. La cámara de ionización condensador podía fabricarse de manera tal que fuera muy pequeña y fácil de llevar y hasta podía ser enviada por correo para ser utilizada en lugares lejanos. Cuando Sievert escribió su primera tesis sobre el nuevo método de medición, éste no estaba muy maduro y estaba lejos de ser “sencillo y confiable”, algo que se logró poco a poco. La detallada descripción del método, con un número de ejemplos de diferentes clases de cámara condensador llegó con la tesis doctoral en 1932. La fabricación de una cámara condensador no era sencilla. Era necesario un trabajo de gran precisión y las partes que contendrían la carga eléctrica debían aislarse en la cámara, en general, con la ayuda de pequeños aisladores de ámbar. El trabajo fue realizado por un fabricante de instrumentos muy habilidoso, *Ragnar Scheer*.

Sievert informó el mismo año sobre el resultado de un número de mediciones de ionización en diferentes clínicas de radioterapia de Suecia (*Acta radiol.* **7** [1926], pág. 461—472). Midió las “dosis de radiación” expresada en “Röntgen”, tal como la unidad había sido definida por la Sociedad Röntgen alemana (la definición internacional de la misma unidad llegaría dos años después en el congreso de radiología internacional realizado en Estocolmo en 1928. Véase el cap. 14). Sievert estudió cuantos “R” equivalían a una dosis eritematosa (DEC, en castellano, HED en sueco) en tres calidades de radiación, determinadas por la filtración de la radiación X. Para la radiación más blanda (muy poco filtrada) él descubrió que los valores se extendían entre 220 y 600 R. Para la radiación media, el intervalo era 230—815 R y para la radiación más dura (filtrada con medio milímetro de cobre o zinc) era de 320—1400 R. Había por lo tanto opiniones muy variadas acerca de lo que era una dosis eritematosa.

La conclusión de Sievert fue que las clínicas de radioterapia suecas necesitaban el control de su dosificación, al igual que sus posibilidades de medir satisfactoriamente la tensión del

tubo de rayos X y las intensidades de corriente. Para eso creó una sala de medición ambulatoria para estandarizar la irradiación en la radioterapia. Con este objeto fue empleado el primer colaborador académico de Sievert, *Robert Thoraeus* (1895–1970).

Gran parte del tiempo de Sievert estuvo dedicado el año siguiente a los preparativos para el congreso internacional de radiología en Estocolmo en 1928, en el que participaría activamente en los dos comités recientemente creados: “ICRP” e “ICRU”.

Simultáneamente la radiología se desarrollaba con rapidez. Gracias a Forssell, Berven y Heyman, la Radiohemmet logró reconocimiento internacional y la radioterapia del cáncer fue un método de tratamiento apreciado. Cuando el rey *Gustaf V* (1858–1950) cumplió 70 años, en 1928, se constituyó el “Fondo del aniversario de Gustaf V” sobre la base de una donación de más de 5 millones de coronas obtenidas en una colecta aportada por el pueblo sueco. El Fondo del aniversario ayudaría en la lucha contra el cáncer y la investigación de esta enfermedad.⁽⁹⁾

El año 1928 fue rico en acontecimientos en muchos aspectos. En la Radiohemmet, que influyó mucho en las posibilidades de trabajo de Sievert, comenzaron dos nuevas etapas. Se compró un nuevo edificio del lado opuesto a la calle Fjällgatan como anexo, y los ingresos del Fondo del aniversario permitieron que él comenzara a planificar un edificio completamente nuevo.

En el anexo de la calle Fjällgatan se creó una sala de asistencia médica con 24 camas nuevas y una sala de rayos X. El laboratorio de Sievert ocupaba una planta completa del anexo con ocho habitaciones más o menos grandes. La actividad de medición ambulatoria de Thoraeus tuvo acceso a un laboratorio de rayos X en el sótano para mediciones de estandarización. Ahora Sievert podía emplear a más personal. En 1929 se empleó a *Arne Forssberg* (1904–1975), bioquímico y biólogo que estudiaba la influencia de la radiación sobre los seres vivos. Un año después se contrató al físico *Sven Benner* (1900–1986). Durante un cuarto de siglo Benner, Forssberg y Thoraeus fueron los colaboradores más importantes de Sievert.

Pero a pesar del nuevo anexo, las instalaciones de Radiohemmet eran todavía pequeñas. Los recursos del Fondo del aniversario dieron algo de esperanza. El rey Gustaf V había creado un comité cuya tarea era proponer la mejor manera de utilizar el fondo para el objetivo propuesto. El comité consideró que el directorio de la Asociación contra el Cáncer debía presentar la mejor pericia al respecto y le pidió que realizara propuestas. Se creó un grupo de trabajo integrado por Forssell, Berven, Heyman, Reuterwall, Sievert y el tesorero de la Sociedad *Falkman*. Con las bendiciones del comité del Fondo del aniversario, el grupo de trabajo tomó contacto con los estudios sobre hospitales de 1926, donde se mencionaban planes para construir un gran hospital nuevo en Norrbacka (lo que luego sería el Hospital Karolinska). Desde un principio se había contemplado que el nuevo hospital contaría con una clínica de radioterapia. Las conversaciones concluyeron en que esta clínica debía ser creada en colaboración con Radiohemmet. Se propuso que recibiera el nombre de *Clínica Aniversario del Rey Gustaf V*.

Después de nuevos estudios y la creación de otro comité, el rey aprobó en mayo de 1929 un “Dictamen y propuesta referidos a la utilización del Fondo del aniversario del rey Gustaf V”. Según la propuesta, el fondo debía utilizarse en primer lugar para la creación de las *Clínicas del Aniversario* para radioterapia en Estocolmo, Lund y Gotemburgo.

Para facilitar la investigación la Clínica del Aniversario Rey Gustaf V de Estocolmo estaba compuesta en parte por una clínica de tratamiento y asistencia llamada Radiohemmet, en parte por instituciones de investigación en radiofísica y radiopatología. El Fondo del aniversario

(9) No debe confundirse con El Fondo contra el Cáncer – Asociación Nacional contra el Cáncer (*Cancerfonden – Riksföreningen mot Cancer*). El Fondo contra el Cáncer fue fundado en 1951 como asociación sin fines de lucro para apoyar la investigación y el estudio. Se financia con subsidios y las cuotas de sus miembros y apoya actualmente a la mayor parte de los proyectos de investigación suecos acerca del cáncer.

aportaría 1 millón de coronas para la clínica de radioterapia, 360 000 coronas para los departamentos de investigación y 1,6 millones de coronas para la compra de radio. La Asociación contra el Cáncer prometió contribuir con 1 millón de coronas para la construcción de la clínica y 150 000 coronas para los departamentos de investigación. La Radiohemmet sería propiedad del estado sueco y constituiría la clínica de radioterapia del planificado Hospital Karolinska. Las instituciones dedicadas a la investigación serían propiedad del Fondo del Aniversario. La complicada organización exigió largas negociaciones entre el estado, el Fondo del aniversario y la Asociación contra el Cáncer. El acuerdo se logró recién en 1933.

La piedra fundamental de la nueva Radiumhemmet fue colocada por Gustaf V el 8 de octubre de 1934. Después de una prolongada huelga de un año que impidió la construcción, no fue posible poner en funcionamiento la clínica antes de octubre de 1937. Las instituciones de investigación de radiofísica y radiopatología estuvieron listas en abril de 1938.

Durante el largo período de preparativos 1929—1937, Sievert ejerció su actividad en el anexo de la Radiohemmet en la calle Fjällgatan. Después del congreso de radiología de 1928, sus contactos internacionales se habían ampliado y fortalecido y ya era conocido en el extranjero. Sus colaboradores también realizaron importantes progresos.

Sievert publicó junto con Arne Forssberg en 1931 un informe para un estudio sobre cómo los diferentes tiempos de irradiación para dar una misma dosis también generaban diferencias en la influencia biológica. Irradiaron huevos de la mosca de la fruta (*Drosophila*) y observaron la frecuencia de huevos muertos después de la irradiación. Si los huevos eran irradiados con 165 r, no se notaba ninguna diferencia para los tiempos de irradiación que variaban entre 2 y 1 800 segundos.

Thoraeus construyó una *cámara estándar* para la calibración del instrumento de medición en la nueva unidad “r”. Según la definición de la unidad, se debe medir toda ionización causada por los electrones y los electrones secundarios que la radiación ionizante libera en un volumen de aire bien definido. Por ello una cámara estándar que tenga este propósito debe disponer de un volumen de aire bien definido. Esto puede lograrse gracias a que se limita el haz de radiación que se utiliza para la irradiación con un diafragma, al mismo tiempo que se establece la longitud de la parte del haz de radiación que se aprovecha, al limitar la longitud de los electrodos que reúnen la carga eléctrica liberada. Los electrodos están constituidos por dos cilindros concéntricos, uno con un diámetro pequeño y otro con un diámetro grande. El haz de radiación que se utiliza para la irradiación incide paralelamente al eje común de los cilindros pero a suficiente distancia de ambos electrodos cilíndricos, para evitar que ningún electrón liberado llegue hasta allí. Toda la ionización tiene lugar en el aire, tal como la definición de “r” lo exige. Las distancias que exige hacen que la cámara cilíndrica exterior deba tener gran diámetro, en el caso de Thoraeus aproximadamente 40 cm, para que la cámara pudiera soportar radiación X a una tensión de hasta 200 kV.

Cuando Thoraeus tuvo su cámara estándar lista, estuvo preparado para escribir una tesis doctoral sobre ella. Sievert, como siempre, tenía muchas cosas entre manos y prefería trabajar con aquello que le preocupaba. Sievert me dijo que los planes que tenía Thoraeus de defender su tesis dieron lugar a un período de conflictos. Él no había defendido ninguna tesis y se vería mal, pensaba, que uno de sus empleados lo hiciera antes que el jefe. Pero Sievert no tenía voluntad alguna de sentarse a escribir una tesis y considerar todas las exigencias académicas que solían establecerse en esos casos. Sin embargo y contra su voluntad comenzó a organizar la redacción de una tesis y dedicó todos sus recursos a eso durante un período.

Sievert superó los objetivos que se había propuesto Thoraeus. La tesis de Sievert se publicó como *Acta radiologica* Supplement 14, 1932, y la tesis de Thoraeus formó parte del Supple-

ment 15 ese mismo año. La tesis de Sievert era rica en ideas e introducía la cámara condensador, con un relato detallado de sus propiedades y ejemplos de su uso. La tesis fue redactada en alemán y el índice de cuatro páginas da fe del relato detallado de todos los aspectos del asunto.

En las mediciones con cámara de ionización con pequeños volúmenes de aire lo dominante era el resultado de la medición de la ionización que generaban los electrones de las paredes de la cámara. Como las paredes no tienen las propiedades del aire, y la liberación de electrones en el material de la pared depende de la calidad de la radiación X examinada de una manera diferente a la liberación de electrones en el aire, una cámara de ionización pequeña, dependiendo de la longitud de onda de la radiación X, será diferente a una cámara grande y el resultado de la medición no puede indicarse sin más en la unidad röntgen. Mediante una cuidadosa elección del material de las paredes de la cámara de ionización, de tal modo que sean más o menos “equivalentes al aire”, esas alteraciones se pueden reducir. Sievert construyó un par de años después una pequeña cámara de ionización con aisladores de ámbar (*björnsten*, en sueco) y paredes de grafito, y por eso fue llamada “cámara bg”. Gracias al pequeño volumen de aire era no perturbable y podía ser utilizada para la medición de altas dosis de radiación en radioterapia. Esas cámaras se hicieron muy populares, y en el extranjero fueron conocidas como “Cámaras Sievert”.

La tesis de Thoraeus era fundamentalmente una descripción detallada de la cámara estándar. Thoraeus era una persona detallista sin la fantasía y riqueza de ideas de Sievert. Sus pretenciosos comentarios acerca de la meticulosa calibración de un cronómetro fueron recibidos con cierta sorna. Si se cree que su descripción de la cámara estándar no era importante, la tesis tenía otros aspectos a favor, como el informe de la absorción selectiva de la radiación X en filtros de metal de diferente composición. Ese estudio condujo al *Filtro de Thoraeus*, un filtro metálico donde las capas de estaño, aluminio y cobre en un determinado orden filtraban la radiación blanda en la terapia con radiación X.

Después de la defensa de la tesis, Sievert se ocupó fundamentalmente de los preparativos de la mudanza a Norrbacka y de los planos del nuevo edificio, en cuya última planta estaría la vivienda de servicio de Sievert. A Sievert le agradaba la idea de planificar los espacios de una nueva institución junto con un arquitecto. Estaba muy interesado que, ante la toma de una decisión que adoptarían otros, se pudieran elaborar propuestas lo más elaboradas posibles, preferiblemente con planos arquitectónicos completos.

El último año en la calle Fjällgatan, en 1937, el grupo de Sievert estaba compuesto por diez personas, incluido él mismo. Además de los ya mencionados Benner, Forssberg, Haglund y Thoraeus, se ven en las fotografías de esa época a *Ragnar Bernstedt*, *Vera von Cronsteen*, *Ulla Forssberg* (esposa de Arne Forssberg), *Anne-Marie Holm* y *Lily Wiksén*. Antes de la mudanza se contrató al ingeniero *Axel Berggren* (1901–) que sería de inestimable ayuda para Sievert, al llevar a la práctica varias ideas diferentes de construcción.

El grupo de Sievert pudo mudarse al nuevo edificio en la primavera de 1938. A diferencia del edificio de radiopatología, no había ningún contacto subterráneo con la Radiohemmet (o luego con el Hospital Karolinska). Y ello había sido intencional: Sievert no quería correr el riesgo de que el gas radón de la Radiumhemmet se filtrara a su laboratorio y contaminara los sensibles instrumentos de medición. Ese vínculo recién se reestablecería en 1996.

13 | La radioprotección internacional y las mediciones de radiación antes de 1928

Ya en 1896 Wolfram Fuchs había publicado recomendaciones de radioprotección muy razonables en la publicación estadounidense *Western Electrician*. Otro estadounidense que también realizó buenas observaciones y dio consejos fue Elihu Thomson (1853–1937), quien primero fue profesor de química y mecánica en la Central High School de Filadelfia y luego uno de los fundadores de la empresa industrial electrotécnica Thomson-Houston Co., después adquirida por General Electric. Thomson publicó también en 1896 sus observaciones acerca de las lesiones causadas por la radiación, que parecían inevitables si la exposición era fuerte, que el grado de las lesiones aumentaba con la envergadura de la exposición, y que la intensidad de la radiación X decrecía en proporción inversa al cuadrado de la distancia.

Durante 1906 la Sociedad Röntgen británica realizó una reunión en Londres para debatir la necesidad de un estándar de radio como base para la estandarización de las mediciones de radiación X⁽¹⁾. La idea era que la radiación gamma constante del radio fuera una referencia adecuada cuando se quería indicar las dosis de radiación en el tratamiento con radiación X. Después de la reunión se aprobó la creación de un comité compuesto por Frederick Soddy, sir Oliver Lodge (1851–1940)⁽²⁾, sir William Crookes, el profesor Rutherford y el profesor C.V. Boys, presidente de la Sociedad Röntgen, para determinar una unidad de la actividad de una sustancia radioactiva.

El comité presentó su informe en 1908 y propuso que 1 miligramo de bromuro de radio puro sería considerado como el estándar y que la ionización que la radiación gamma generara, después del blindaje con 5 mm de plomo, se utilizaría como medida. De esa manera la ionización que generara la radiación X podía expresarse con la ayuda de un estándar radiactivo y sería posible tratar la radiación X más cuantitativamente que antes.

El desarrollo internacional se hizo cargo del resto. En el congreso internacional de radiología y electricidad en Bruselas en 1910 se eligió la International Radio Standards Commission, bajo la presidencia de Rutherford con el objeto de obtener un estándar de radio y Marie Curie se comprometió a producirlo. Este preparado estándar estuvo terminado en 1911 y el 21 de agosto se informó que estaba compuesto por 21,99 miligramos de cloruro de radio puro dentro de un tubo de vidrio delgado. En marzo de 1912 se reunió la comisión en París y comparó el estándar de Marie Curie con tres preparados estándar semejantes fabricados por Otto Höngschmid (1878–1945) en Viena, y resultó que coincidían con un error marginal de 1:300. Se resolvió aceptar el preparado de Marie Curie como el estándar de radio internacional y se conservaría en el Bureau international des poids et mesures, BIPM en Sèvres. Uno de los preparados de Höngschmid conteniendo 31,17 miligramos de cloruro de radio se conservaría como estándar secundario en Viena.

Se acordó también la fabricación de preparados estándares nacionales para los países que los solicitaran. Se fabricarían en el Institut für Radioforschung de Viena. Uno de los preparados (el número 3) se envió a Inglaterra para conservarlo en el National Physical Laboratory (NPL).

En el congreso de radiología en Bruselas de 1910 se propuso también una unidad para la cantidad de radón, que no podía indicarse en gramos tan fácilmente como el radio. Para honrar a Marie Curie se llamó curie a esta unidad y se definió como 1 curie a “la cantidad de radón que está en equilibrio radiactivo con un gramo de radio”.

(1) “Estándar” era la palabra que se utilizaba. Actualmente en Suecia utilizamos con frecuencia la palabra “normal” en contextos similares.

(2) Sir Oliver, profesor de física y rector de la universidad de Birmingham, era un conocido escritor de divulgación científica. Después de 1909 comenzó a dedicarse al espiritismo, al igual que Sir Arthur Conan Doyle, y creía que se había contactado con el espíritu de su hijo caído en combate después de la guerra.

En los planes de trabajo del NPL para los años 1914—1915 se señaló nuevamente la necesidad de poder “medir la radiación X” con el siguiente comentario, según E.E. Smith (véase la referencia):

Si se pudieran desarrollar pruebas para asegurar una medición minuciosa de la energía X, sería de gran ayuda para la asistencia médico-sanitaria. El problema con la unidad práctica de la energía X no es tan distante de la equivalente para la radiación gamma del radio y no hay duda alguna de que si se pudieran desarrollar las pruebas adecuadas para la radiación X, se podría, al menos a largo plazo, poder expresarse en medidas de radiación gamma de un preparado de radio.

El término “dosis absorbida” no existía. Todavía no había tanto interés respecto de lo que sucedía físicamente en el cuerpo irradiado sino que se quería tener una medida de aquello que se irradiaba en él. Al mismo tiempo, es decir, poco antes de la guerra, la Sociedad Röntgen británica designó un “Comité para la medida y dosificación röntgen” en el que el físico W.C. Kaye (1880—1941) participó como representante del Laboratorio de Física Nacional (National Physical Laboratory). Kaye había llegado al NPL proveniente del laboratorio Cavendish poco antes de la I Guerra Mundial, pero dejó el laboratorio por el servicio militar al desencadenarse la guerra y volvió recién en 1920. El comité revivió en 1920 y fue ampliado en 1923 para formar un comité conjunto con la Physical Society, cuyo presidente fue sir William Bragg (1862—1942). El comité estaba integrado por el profesor F.A. Lindemann (más tarde Lord Cherwell)⁽³⁾, el profesor A.W. Porter, G.W.C. Kaye, el profesor Sidney Russ (1879—1963) y E.A. Owen (nacido en 1887). Owen, que había llegado al NPL en 1912, fue el secretario del comité. En sus inicios se llamó British X-ray Units Committee pero finalmente se convirtió en el British Committee on Radiological Units (BCRU) y llegó a tener un papel significativo en el desarrollo internacional futuro.

En 1951 el Comité de Radioprotección Sueco (un comité acerca de la organización de la radioprotección en Suecia) indicó en su dictamen SOU 1956:38 que Dinamarca era probablemente el primer país que impuso la exigencia de un permiso para el trabajo con equipos röntgen. Ya en 1907 se estableció que se exigiría una licencia otorgada por la Comisión Eléctrica, creada por el estado. Sin embargo parece ser que esa disposición no se aplicó tan ampliamente. De todos modos Dinamarca fue el primer país que tuvo una legislación en este tema gracias a la ley del 15 de abril de 1930 acerca del “Uso de los rayos X”, que ordenaba al ministro del interior a emitir disposiciones acerca de las instalaciones de rayos X y el uso del radio. Se encargó al Sundhedsstyrelsen (Organismo de Salud Pública) que controlara la ley y las subsiguientes disposiciones.

La Sociedad Röntgen alemana (Deutsche Röntgen Gesellschaft), conocida también por sus siglas “DRG”, redactó en 1913 un número de recomendaciones relacionadas con la radioprotección (Merkblatt über den Gebrauch von Schutzmassregeln gegen Röntgenstrahlen). Mi traducción libre de esas recomendaciones es la que sigue a continuación:

1. La irradiación repetida del cuerpo humano, independientemente de la parte de que se trate, es peligrosa y en muchos casos ha provocado lesiones graves e incluso la muerte entre los radiólogos. Es importante que tanto esas personas como sus superiores y empleadores dispongan la existencia de dispositivos de seguridad accesibles en los lugares de trabajo y que todas esas

(3) En el libro de C.P. Snow *Science and Government* (1960) hay un interesante relato referido a un conflicto posterior entre sir Henry Tizard (1885—1959) y Frederick Alexander Lindemann (1885—1957), donde éste es descrito como una persona con un criterio científico inferior y mal consejero en el bombardeo estratégico de Alemania durante la II Guerra Mundial.

personas reciban instrucción respecto de la necesidad del uso de esos dispositivos. Esto último puede realizarse mediante el acceso abierto a esta información en todos los lugares de trabajo.

Luego se daban recomendaciones sobre el espesor del plomo para que éste fuera una pantalla efectiva ante la radiación y señalaba que “debido a que el plomo es tóxico, la pantalla debe estar cubierta de ambos lados con materiales tales como madera, pintura o semejantes. Y agregaba:

4. Aún cuando se utilice esa pantalla protectora es recomendable (especialmente cuando la irradiación es prolongada) mantener la mayor distancia posible del tubo de rayos X utilizado.

Y finaliza afirmando:

9. Cada asistente, alumno o aprendiz, cada enfermera y cada miembro del personal tiene derecho a negarse a participar en el trabajo radiográfico si las disposiciones de protección son insuficientes. Esa negativa no podrá ser nunca invocada como causa de despido. El mismo criterio tendrá validez para el personal de las fábricas y tiendas donde se fabriquen o vendan equipos, instrumentos y tubos de rayos X.

Esas recomendaciones de la DRG son sorprendentemente ambiciosas y podrían haber prevenido las lesiones causadas por la radiación entre el personal si se las hubiese respetado. Es interesante observar la advertencia respecto de la toxicidad del plomo y el derecho del personal a negarse a trabajar si la protección no fuera satisfactoria.

En Inglaterra Sidney Russ llamó la atención de la británica Sociedad Röntgen en 1915 sobre el desarrollo y las lesiones entre el personal que trabajaba con rayos X. La guerra mundial que tenía lugar entonces había aumentado mucho el uso de los rayos X en el campo de batalla y los hospitales militares, a menudo con personal sin capacitación y aparatos riesgosos. Ese año la Sociedad tuvo su asamblea anual el 1 de junio en el The Cancer Hospital en la calle Fulham Road de Londres bajo la presidencia de sir A. Pearce Gould. El debate giró alrededor de cómo se podría proteger a quienes utilizaban aparatos de rayos X y se propuso que el ministerio de defensa debería prestar un aparato de rayos X a la Sociedad para que lo equipara con dispositivos de protección adecuados y de esa manera demostrar qué debía hacerse.

Se discutieron dos cuestiones técnicas en profundidad. Una de ellas era el vidrio con óxido de plomo. Se había establecido que el espesor del vidrio con óxido de plomo no era un indicador decisivo de su capacidad protectora. A veces un vidrio más delgado podía proteger mucho mejor que uno más grueso. Era la calidad del vidrio y el peso volumétrico los que explicaban la diferencia. La segunda cuestión era la necesidad de protegerse de la radiación secundaria que podía provenir de otro lugar diferente al ánodo del tubo de rayos X.

Se acordó que “teniendo en cuenta el gran aumento de la cantidad de instalaciones de rayos X durante los últimos tiempos, la Sociedad considera que es muy importante que la seguridad personal de aquellos que realizan estudios con rayos X se garantice mediante la aceptación general de normas estrictas”.

Era evidente que se necesitaban normas y esto se vio reflejado en el artículo de Kaye “The Story of Protection” en la publicación *Radiography* de 1940: “Los conceptos elementales de protección tales como la distancia y el blindaje son obvios. Lo notable es el tiempo que tomó aplicarlos. [...] Recuerdo muy bien muchas salas en las que se podían ver los huesos de la mano contra una pantalla fluorescente portátil en cualquier parte del laboratorio de rayos X.” Ante el pronun-

ciamiento de la Sociedad Röntgen, los que tuvieron en cuenta sus recomendaciones no fueron las autoridades civiles sino el Comité Röntgen del Ministerio de Guerra británico, que durante la guerra impartió instrucciones para el personal militar que trabajaba con rayos X.

A comienzos de la década de 1920 la opinión pública británica estaba preocupada por los artículos periodísticos acerca de las muertes de conocidos radiólogos como consecuencia de las lesiones causadas por la radiación, a pesar de todas las instrucciones adoptadas durante la guerra. Esto provocó que el Dr. Robert Knox (1867—1928), presidente de la Sociedad Röntgen británica, escribiera el 29 de marzo de 1921 al *The Times* y propusiera la creación de un comité para investigar las condiciones existentes. La propuesta se ejecutó casi de inmediato, y dio lugar a la creación de la británica X-ray and Radio Protection Committee, cuyo presidente fue sir Humphry Rolleston (1862—1944). Sir Humphry era doctor en medicina pero “Regius Professor” de física en Cambridge.⁽⁴⁾ Uno de los dos secretarios era el Dr. Stanley Melville (nacido en 1869), que sería secretario general del primer congreso internacional de radiología en Londres en 1925. Melville era doctor en medicina y trabajaba en el St. George’s Hospital de Londres. Este comité estaba integrado también por G.W.C. Kaye.

El comité trabajó muy rápido y dio un informe preliminar en julio de 1921 y un “Memorandum Nro.2” en diciembre del mismo año. Al respecto escribió Eric Smith en su reseña histórica sobre los acontecimientos:

Parece no existir relación directa alguna entre las recomendaciones redactadas en 1915 y 1921 en Gran Bretaña, aunque hubo factores comunes tales como la Sociedad Röntgen y el profesor Russ. La iniciativa de 1915 fue tomada por el almirantazgo y el Ministerio de Guerra pero parece haber muerto durante los esfuerzos de guerra hasta que fue revivida por la carta de Knox en el *Times* del 27 de marzo de 1921. Probablemente el trabajo presentado hizo que el nuevo comité pudiera pronunciarse con tanta rapidez pero esa es la única relación.

En el informe preliminar se solicitaba ayuda para continuar el trabajo. Y luego decía:

El peligro de sobreexposición a la radiación X y el radio puede evitarse mediante la protección efectiva y condiciones de trabajo adecuadas.

Los efectos conocidos de los que se debe proteger al operador son:

1. Las lesiones visibles en tejidos superficiales que puedan causar destrucción permanente.
2. Alteraciones de órganos internos y cambios en sangre. Estos son especialmente importantes, ya que se suele hacer caso omiso ante su aparición temprana.

Luego siguen recomendaciones sobre la limitación del horario laboral y mayores vacaciones:

Se recomiendan las siguientes precauciones:

1. No más de 7 horas de trabajo por día;
2. Los domingos y dos medio días libres por semana, para pasar al aire libre tanto como sea posible;
3. Vacaciones anuales de un mes o dos períodos separados de vacaciones de 2 semanas cada uno;
4. Las enfermeras y asistentes de enfermería de tiempo completo en las salas de rayos X y radio no deberán realizar otros trabajos en el hospital.

(4) Regius Professor (en Oxford y Cambridge) era comúnmente un profesor cuya cátedra había sido creada por el rey Enrique VIII.

Luego continuaba con un número de recomendaciones técnicas para diferentes tipos de trabajo con radiación. Los límites de dosis eran todavía un concepto desconocido, sin embargo se daban recomendaciones detalladas sobre el blindaje y el confinamiento de las fuentes de radiación. Teniendo en cuenta los riesgos de descargas eléctricas, se recomendaba que los pisos de hormigón fueran cubiertos con alfombras aislantes, los cables eléctricos debían estar aislados y en cualquier caso no podían colgar sueltos y todas las partes de metal de los aparatos debían conectarse a tierra.

Durante el período 1921—1925 sucedieron muchas cosas en otros países. En Noruega, la Asociación de Radiología noruega se dirigió al gobierno en 1923 para solicitar la redacción de directivas de protección en el trabajo radiológico. Esto tuvo lugar después de que la asociación creó un grupo de trabajo el 16 de mayo de 1922 para proponer medidas de protección en el trabajo con rayos X y el radio. El grupo estaba compuesto por cinco personas: *P. Amundsen, E. Berle, Ellen Gleditsch*,⁽⁵⁾ *S.A. Heyerdahl* y *L. Vegard*. Sus recomendaciones eran extensas y deben haber sido de gran ayuda cuando la Asociación de Radiología sueca adoptó una decisión semejante en 1928.

En Italia se redactaron disposiciones de protección tanto para radiólogos como para los pacientes el 18 de julio de 1925. En la Unión Soviética el Comisariado del Pueblo resolvió disposiciones de protección para los trabajos con rayos X el 9 de septiembre de 1925.

La evolución del tema había llegado tan lejos que ya existía la necesidad de una agrupación internacional de radiólogos. No se pensaba tanto en los problemas de radioprotección sino en la necesidad de llegar a un acuerdo sobre cómo se podrían medir las dosis de radiación y la intensidad de la radiación X. Ya durante el Congreso Röntgen en Berlín en 1905, con motivo de los 10 años del descubrimiento de Röntgen, se presentó una propuesta para crear un comité internacional para elegir una unidad adecuada que midiera la intensidad de la radiación X, pero se consideró que todavía no había llegado el momento de hacerlo. En su lugar, hubo acuerdo en mantener la cuestión bajo observación.

Cuando las fronteras se abrieron después de la I Guerra Mundial, se retomaron los contactos internacionales y los físicos y radiólogos realizaron largos viajes. El encuentro del joven Rolf Sievert con Gösta Forssell en un viaje a los EE.UU. es solo un ejemplo. Los nuevos contactos hicieron más evidente la necesidad de estandarizar los métodos de medición de la radiación X.

Se habían utilizado muchos métodos diferentes para medir algo que en la actualidad llamaríamos dosis absorbida. Sin embargo se podían diferenciar tres diferentes aspectos físico-químicos: la dosimetría química, el ennegrecimiento de la película fotográfica y la medición de la ionización que la radiación genera en el aire.

El método más utilizado para la dosimetría química había sido propuesto por el radiólogo austríaco Guido Holzknacht y se basaba en el cambio de color de tabletas de platino-cianuro de bario después de la irradiación. El color se podía comparar con un color estándar que indicaba la medida de la dosis. En el NPL se comparaban esos cambios de color (se utilizaban las pastillas originales Sabouraud, véase el cap. 10) con la ionización causada por la radiación en un electroscopio de láminas de oro. Esta ionización podía luego ser comparada con la ionización que la radiación gamma de un preparado de radio conocido generaba en el mismo electrómetro.

(5) Ellen Gleditsch (1879—1968) era una conocida radioquímica que había trabajado antes con Marie Curie, y junto con la sueca Eva Ramstedt escribió en 1917 el libro *Radio y procesos radiactivos*.

La manera más sencilla de indicar la intensidad de la radiación X había sido hasta entonces mediante la intensidad de corriente y la tensión, y contar con que la intensidad de la radiación disminuyera con la distancia según la ley de la inversa del cuadrado. Se calculaba de manera global que la intensidad era proporcional a la intensidad de la corriente, y al cuadrado de la tensión máxima sobre el tubo (véase el cap. 10).

En el NPL no hubo un uso más directo de la ionización como medida de una “dosis de radiación”. Sin embargo, las unidades “dosis” basadas en la ionización del aire habían sido propuestas en Francia ya en 1908 por Paul Villard (quien descubrió la radiación gamma) y en EE.UU en 1914 por William Duane (1872—1935) en la universidad de Harvard (Duane había sido becado como investigador en el laboratorio Curie en París entre 1907 y 1913).

La cuestión referida a los métodos de medición de la intensidad de la radiación X y la “dosis de radiación” surgió con fuerza cuando los radiólogos del mundo se reunieron en Londres para el primer congreso de radiología internacional de 1925. La Sociedad Röntgen tuvo un importante papel en la realización del congreso. Kaye era miembro de los comités de organización y del programa, y Owen era el secretario de la sección de física. El Comité de la Unidad Röntgen británico recibió la tarea sugerida por el congreso de crear un comité internacional semejante. Es lo que hoy conocemos por la sigla en inglés ICRU: International Commission on Radiation Units and Measurements, que nació de esa manera en Londres en 1925. Las discusiones que se realizaron durante el congreso llevaron a que se decidiera tratar la cuestión, esto es, una medición dosimétrica basada en la ionización del aire, en el próximo congreso internacional de radiología, que gracias a la reputación de Gösta Forssell se realizó en Estocolmo en 1928.

Durante el congreso en Londres hubo también acuerdo en crear un comité de radioprotección para redactar recomendaciones que podrían ser tratadas durante el congreso en Estocolmo. Sievert escribió acerca de los preparativos en un informe para Historia de la Radiofísica en 1960:

Durante 1927—28 se dedicó gran parte del trabajo en el laboratorio físico de la Radiohemmet a los preparativos del II congreso internacional de radiología en Estocolmo en 1928. Los preparativos comprendieron entre otras cosas la elaboración junto con otros radiólogos de una primera propuesta de normas de protección para el trabajo con rayos X y preparados radiactivos.”

Pero Sievert estaba trabajando también en la estandarización de los métodos de medición y las unidades. En mayo de 1926 Sievert fue designado junto con Manne Siegbahn para integrar la comisión internacional sobre unidades y mediciones, cuestión que había sido resuelta en Londres el año anterior.

A falta de una medición dosimétrica general aceptada, los radiólogos trabajaban hasta entonces basándose en la experiencia clínica. La reacción cutánea a la irradiación fue el principal indicador y guía para la dosificación. Como medida se utilizaba una unidad identificada con la sigla en sueco “HED” (correspondiente en ese idioma a “Dosis eritematosa”) (véase el cap. 12) y en otros idiomas, como el inglés, con las letras, “SED”, Skin Erythema Dose. “HED” o “SED”, según el idioma, era una dosis absorbida que apenas causaba un eritema cutáneo, es decir, un enrojecimiento de la piel.

A comienzos de 1920 se discutió intensamente la necesidad de valores límite para la radiación que podía recibir el personal que realizaba trabajos radiológicos sin riesgo de lesiones severas. Una propuesta de valores límite fue realizada en septiembre de 1924 por el físico estadounidense, Arthur Mutscheller (nacido en 1886) en una conferencia en la

asamblea anual de la American Roentgen Ray Society, con el título “Physical Standards of Protection Against X-Ray Hazards”. La disertación fue publicada en 1925 en la publicación *American Journal of Roentgenology*.

Mutscheller introdujo una “dosis de tolerancia”, es decir una dosis absorbida que pudiera ser recibida sin riesgo de lesiones, cuya tamaño era de 0,01 HED por mes. Sievert consideró en 1925 que una dosis anual de 0,1 HED debía ser inofensiva. El radiólogo inglés Alfred Barclay (1876–1949) y su asistente Sidney Cox publicaron en 1928 un trabajo (en la *American Journal of Roentgenology*) donde estimaban la dosis de tolerancia en 0,08 HED por año. Ya que ninguno de esos autores conocía a los demás, la coincidencia fue asombrosa, especialmente si se tiene en cuenta que todas las estimaciones se basaban en supuestos muy inseguros. Con las mediciones y conocimientos actuales 0,1 HED por año debe equivaler a 600-900 milisievert por año (comparar con el límite de dosis anual actual, que es de 20 milisievert en promedio durante un período mayor, para quienes trabajan con fuentes de radiación).

Otro avance importante en la década de 1920, que poco a poco influiría en el trabajo de radioprotección internacional, fue el descubrimiento del genetista Hermann Mullers (1890–1967) en 1927 según el cual la radiación X podía generar cambios, mutaciones, de carácter hereditario. Muller expuso esta cuestión en el 5º congreso de genetistas internacional realizado en Berlín ese mismo año. Sus estudios se basaron en la mosca de la fruta y darían comienzo a una amplia investigación sobre la mutación genética. Muller obtuvo el premio Nobel de medicina en 1946 por su descubrimiento.

Hubo que esperar hasta la década de 1950 antes de que la capacidad de la radiación de afectar los caracteres hereditarios influyera sobre los esfuerzos de la radioprotección. Sin embargo los métodos de Muller se utilizaron desde muy temprano en la investigación de la herencia, sobre todo en Suecia gracias a los aportes de Gert Bonnier (1890–1961), profesor de genética en la Escuela Superior de Estocolmo, y los estudios sobre la selección genética de plantas realizados por el profesor Åke Gustafsson (1908–1988), del Instituto de Investigación Forestal del Estado y la Universidad de Lund, poeta y ensayista. Tanto Bonnier como Gustafsson colaborarían luego con Sievert en cuestiones de radioprotección.

14 | ICRP, ICRU Y NCRP: los primeros tiempos

El decano de la radioprotección estadounidense es *Lauriston S. Taylor* (1902–), que goza todavía de mucho vigor. Taylor había ingresado en este terreno en 1927 cuando fue empleado en la National Bureau of Standards (NBS) en Washington. Ese mismo año recibió la visita de Kaye, del National Physical Laboratory de Inglaterra. Kaye trabajaba, a pedido del congreso de radiología en Londres de 1925, intentando lograr que un número de físicos que pudieran estar interesados en la radioprotección participara en el próximo congreso en Estocolmo en 1928. Él sabía que NBS era el equivalente estadounidense del NPL y buscó en primera instancia un físico estadounidense adecuado. El resultado fue que se encargó a Taylor viajar a Estocolmo como representante de la NBS.

Kaye, que planificó todo detalladamente, le pidió a Taylor que antes de la visita a Estocolmo se encontrara con dos físicos alemanes, Friedrich Dessauer y *Gustav Grossmann* (1878–1957) en Berlín. Grossmann era empleado de Siemens & Halske AG en Berlín desde 1911 y era jefe de investigaciones desde 1919 en Siemens-Reiniger-Weifa Co. que desarrollaba aparatos para la electromedicina.

En un simposio en French Lick, Indiana, en septiembre de 1978 sobre el tema “Cincuenta años de Radioprotección” Lauriston Taylor dio una conferencia de la cual extraemos algunos conceptos (véase Ref. ”Tayl 1980):

Alemania tenía un problema semejante al que teníamos en los Estados Unidos. Había al menos dos grupos en Alemania y cada uno de ellos había desarrollado un tipo de filosofía referida a la radioprotección y nunca se pusieron de acuerdo en tener un punto de vista único para plantear en Estocolmo. En los Estados Unidos la situación era la misma. Allí habían como mínimo tres grupos con diferentes opiniones acerca de cómo deberían redactarse las recomendaciones sobre radioprotección, es decir que no existían puntos de acuerdo ni en Alemania ni en los EE.UU.

En lo que se refiere a los EE.UU. es para mí desconcertante que existan aquí tres comités que trabajen con radioprotección y mediciones. O lo debería mencionar en otro orden: Mediciones y radioprotección, ya que las mediciones eran el mayor problema en esa época. Antes de haber resuelto los problemas de medición, no se podían tratar los relacionados con la protección.

En esos tres comités había nueve o diez individuos que representaban al total de personas en los EE.UU. que tenían algún antecedente o interés en esta cuestión. Entre los comités había un 75% de superposición pero sin embargo los tres tenían diferentes recomendaciones en lo que a normas de radioprotección se refiere y eso fue lo que mostramos en Estocolmo.

Así conocí a Grossmann. Éste era una persona muy agradable y me invitó a su casa y conversamos mucho sobre diversas cuestiones. Pero no arribamos a acuerdos satisfactorios sobre qué postura expondríamos en Estocolmo. No recuerdo los detalles, pero recuerdo esa noche. Ya que yo era un joven visitante de los EE.UU. que cenaba en su casa, ellos pensaron que debían presentar algo especial. Y lo hicieron: Me invitaron a comer choclos. Pero en la Alemania de esa época se sabía que había dos tipos de choclos: uno para el ganado y otro para las personas. Si quiere divertirse, mastique un choclo duro y entero para ganado y agradezca luego al anfitrión por la comida. Pero él también debe comerlo.

Finalmente llegamos a Estocolmo donde conocimos a Kaye y Stanley Melville, dos personas que estaban destinadas a ser designadas como secretarios de honor de un grupo internacional de radioprotección, si es que alguna vez se creaba. Hay que recordar que todavía no existía un grupo oficial. Estábamos obligados a formarlo. Antes de la reunión los británicos presentaron un conjunto de propuestas para que el congreso las analizara. Las propuestas se basaban fundamentalmente en aquellas que habían sido aprobadas (por la Sociedad Röntgen británica)

en 1921 pero también comprendía a la estadounidense. Nunca me quedó claro el significado de ellas. Eran recomendaciones redactadas por la American Roentgen Ray Society, pero con la excepción de los últimos párrafos eran idénticas a las británicas y había un tipo de conferencia de Pfahler.⁽¹⁾ Nunca comprendí si representaban algo oficial o no. Y los suecos también tenían recomendaciones detalladas semejantes a las británicas⁽²⁾. Con relación al encuentro en Estocolmo, existía cierta unidad, al menos entre los británicos y los suecos.

Continúo citando a Lauriston Taylor, que habla con sinceridad acerca de la reunión en la que él y Sievert se conocieron.

Entre paréntesis debo mencionar, en relación con las propuestas de la American Roentgen Ray Society, que hay dos personas de nuestro país a las que debemos agradecerle más que a nadie por lo realizado en el campo de la radioprotección. Uno de ellos es George Pfahler, radiólogo de Filadelfia, el otro es el Dr. Shearer,⁽³⁾ un físico de Ithaca, Nueva York, y Cornell. Fueron esas dos personas las que realmente comenzaron a presionar planteando la radioprotección a comienzos de 1916, y las que impulsaron las normas de radioprotección.

Pero regresemos a Estocolmo: Allí estábamos Kaye, Melville, Grossmann y yo. Sievert también estaba, pero asistía además a las reuniones del comité que debatía la unidad, o sea que no tuvimos mucho contacto personal antes de que ICRP se formara y él fuera elegido como miembro de dicha institución. Los cuatro intentamos eliminar las diferencias para ver si podíamos ponernos de acuerdo sobre la base de las propuestas británicas y suecas.

Grossmann era un poco molesto. Era el único que estaba allí junto con su esposa. Nuestro grupo formado por cuatro miembros tuvo una reunión informal en un rincón de la enorme sala del ayuntamiento de Estocolmo cuando se estaba realizando un acontecimiento importante.

Grossmann estaba incómodo pues debía dejar a su esposa sola, mientras nosotros nos dedicábamos a debatir cuestiones técnicas. Finalmente Kaye notó que Grossmann estaba inquieto y preocupado por su esposa y pensó que nosotros podíamos hacer algo para tranquilizarlo. De esa manera podríamos avanzar en nuestras conversaciones. No recuerdo exactamente cómo fue, pero puesto que yo ya la conocía y sabiendo con quién debía lidiar, le pregunté si quería bailar un rato. Ella era una bailarina encantadora y bailamos mientras Grossmann se relajaba. Pronto recibí una señal de Kaye indicando que todo estaba bien y volví con la señora Grossmann. El Dr. Grossmann estaba encantado y satisfecho y luego me invitó a cenar. Luego todo funcionó muy bien.

El congreso de radiología se realizó en Estocolmo entre el 23 y el 27 de julio de 1928. Gösta Forssell fue su presidente y Lars Edling y James Heyman sus vicepresidentes. El secretario general era *Axel Renander* (1895–1968), entonces médico radiólogo en el hospital Sahlgrenska de Gotemburgo, luego médico del hospital de Västerås. Forssell (como presidente), Renander,

(1) George Edward Pfahler (1874–1957) fue uno de los radiólogos más famosos de EE.UU y trabajaba en Filadelfia. Estaba muy interesado en la radioprotección e introdujo en 1903 el diafragma y los colimadores para evitar la irradiación innecesaria de los pacientes y filtros de plomo para filtrar la radiación blanda inútil. En 1919 introdujo la película fotográfica como dosímetro en el personal.

(2) La Asociación Sueca de Radiología Médica se dirigió a la autoridad sueca en asuntos médicos el 31 de marzo de 1928 y le propuso disposiciones que debían formalizarse y un inspector especial, cargo creado en virtud de la ley de protección laboral. La asociación solicitó también el 27 de abril del mismo año que se establecieran requisitos especiales para aquellos que utilizaran radiación X y radio con propósitos médicos.

(3) J.S. Shearer (1865–1922) era un físico que realizaba trabajos con rayos X en la universidad de Cornell. Luego fue dueño de una escuela de rayos X para el ejército en Nueva York.

Edling, Heyman, Berven y Sievert integraron el “Board of Management” del congreso. Se había organizado una exposición especial en el salón de arte Liljevalch, en la cual alrededor de 45 empresas mostraban aparatos e instrumentos para radiología médica.

El congreso fue abierto con solemnidad en la casa de conciertos de Estocolmo, con la presencia del príncipe heredero Gustaf Adolf. El profesor Forssell dio un discurso de bienvenida en alemán mientras que el príncipe lo hizo en inglés. Habló sobre la radiación X y el radio. Esta es mi versión libre del mismo:

Es sabido que existe un peligro considerable vinculado a los profesionales que manipulan a estos nuevos benefactores de la humanidad. Así fue en sus comienzos, antes de adquirir la suficiente experiencia acerca de los peligros relacionados con ellos. Muchas vidas valiosas se han perdido, muchos trabajadores del campo de la radiología han sido lentamente llevados a la muerte por estos benefactores y enemigos invisibles. [...] honremos su memoria siguiendo sus pasos y apoyando sus esfuerzos.

Participaron en el congreso de radiología de Estocolmo 964 asistentes de 46 países o regiones. Puede ser interesante conocer los nombres de algunos de los participantes de otros países. Los siguientes 38 asistentes al congreso han tenido un papel importante en la historia de la radiología y la radioprotección. No mucho tiempo después del congreso conocí a doce de ellos y tuve una relación más estrecha con cinco (Mayneord, Jaeger, Failla, Holthusen y Taylor) y de mayor cercanía aún con Failla y Taylor. Lauriston Taylor y Val Mayneord (que tendrían un gran papel en ICRP después de la II Guerra Mundial) tenían 26 años y los llamaban, según lo que Taylor me contó, “the Congress Babies”. Rolf Sievert había alcanzado la edad madura con 32 años.

Dinamarca:	P. Flemming Møller	Alemania:	G. Grossmann
Inglaterra:	A.E. Barclay		H. Holthusen
	G.W.C. Kaye		R. Jaeger
	W.V. Mayneord		H. Küstner
	S. Melville		H. Meyer
	E.A. Owen		B. Rajewsky
	R. Paterson	EE.UU.	C.B. Braestrup
	H. Rolleston		G. Bucky
Francia:	A. Béclère		W. Duane
	C. Regaud		G. Failla
	I. Solomon		O. Glasser
Holanda:	A. Bouwers		B.H. Orndoff
Italia:	F. Perussia	EEUU	C.F. Potter
Japón:	M. Nakaidzumi		E.H. Quimby
Noruega:	S.A. Heyerdahl		A. Soiland
Suiza:	H.R. Schinz		K.W. Stenström
Alemania:	H. Behnken		L.S. Taylor
	F. Dessauer	Austria:	G. Holzkecht
	W. Friedrich		R. Kienböck

El comité ejecutivo del congreso de radiología y luego el congreso en su totalidad aprobaron la creación de un comité, el International X-Ray and Radio Protection Committee, la organiza-

ción que luego se llamaría ICRP.⁽⁴⁾ El acta de la asamblea general del congreso fue publicada en el *Supplement 3* del *Acta radiologica* (1929). El nuevo comité tenía, según el acta, la siguiente composición:

Rolf Sievert, Estocolmo, presidente
G.W.C. Kaye, Londres, secretario de honor
Stanley Melville, Londres, secretario de honor
Giulio Ceresole, Venecia
G. Grossmann, Berlín
I. Solomon, París
L.S. Taylor, Washington

Si bien Sievert, como anfitrión en Estocolmo, fue elegido cortésmente como presidente del comité, fue Kaye quien lo condujo, guiado por la ambición, la edad y la experiencia. Taylor, el más joven, era quien tomaba nota y funcionaba como secretario.

Las recomendaciones en las que hubo acuerdo aparecieron editadas en el suplemento de 1929 del *Acta radiologica*. Se trata de cuatro capítulos con 41 párrafos cortos en total. El párrafo inicial comienza así:

1. El peligro de sobreexposición a la radiación X y el radio puede evitarse mediante la protección efectiva y condiciones de trabajo adecuadas. Los responsables de los departamentos de rayos X y radio están obligados a garantizar esas condiciones para su personal. Las lesiones conocidas de las cuales debemos protegernos son:
 - (a) Lesiones en tejidos superficiales;
 - (b) Alteraciones de órganos internos y cambios en sangre.

El primer capítulo comprendía un párrafo con recomendaciones acerca de la limitación del horario laboral:

2. Se recomiendan los siguientes horarios de trabajo para quienes tienen trabajo de tiempo completo con radiación röntgen o radio:
 - (a) No más de 7 horas de trabajo por día;
 - (b) No más de cinco días laborales por semana. Pasar los días libres al aire libre tanto como sea posible;
 - (c) No menos de un mes de vacaciones por año;
 - (d) Los que trabajan horario de tiempo completo en las salas de rayos X y radio no deben participar en otros quehaceres en el hospital.

El motivo por el cual se quería limitar el horario laboral era en parte disminuir la exposición a la radiación, y en parte evitar la lesión más temida: la destrucción de los órganos que

(4) ICRP, según su sigla en inglés, significa International Commission on Radiological Protection, una organización no gubernamental, en actividad desde 1928. ICRP es el organismo internacional que emite las recomendaciones sobre políticas básicas de radioprotección. Esas recomendaciones son la base de las indicaciones más detalladas que elaboran instituciones especiales tales como la Organización Mundial de la Salud (WHO), el Organismo Internacional de Energía Atómica en Viena (IAEA), la Organización Internacional del Trabajo en Ginebra (ILO) y el organismo de energía nuclear de la OCDE, como así también las disposiciones emitidas por las autoridades nacionales, como el Instituto de Radioprotección del Estado en Suecia (Statens strålskyddsinstitut). La organización hermana ICRU (International Commission on Radiation Units and Measurements) tiene tareas similares relacionadas con magnitudes, unidades y métodos de medición de radiación y sustancias radioactivas.

producen sangre cuya consecuencia es la anemia aplásica, considerada como motivo de mayor riesgo de infecciones y otras enfermedades. Se consideraba que tomar licencia y pasar el día al aire libre mejoraba la capacidad de resistencia. Debemos recordar que un mes de vacaciones en la década de 1920 era para la mayoría una prolongación significativa de las vacaciones. La semana de cinco días también era algo nuevo. Hoy consideramos que las recomendaciones del segundo párrafo constituyen una exigencia razonable para cualquier trabajo, no solo para el trabajo con radiación.

El siguiente capítulo contenía siete párrafos generales sobre el diseño de los locales para el trabajo con aparatos de rayos X. Era evidente que se trataba del mismo razonamiento que para las restricciones del horario de trabajo: Se consideraban saludables la luz y el aire fresco. Se recomendaba que todas las salas de rayos X estuvieran situadas por encima del suelo y que todas las habitaciones, incluido el cuarto oscuro, tuvieran ventanas que “ofrecieran buena iluminación natural” y “sol y aire libre cuando esto fuera posible”. Todas las habitaciones debían tener dispositivos de ventilación que cambiaran el aire al menos diez veces por hora. La entrada y salida de aire debía estar situada de tal modo que la corriente de aire cruzara las habitaciones.

La habitación de la sala de rayos X debía ser lo suficientemente grande como para permitir la colocación de los instrumentos correspondientes. La habitación de rayos X debía tener, como mínimo, 25 m² y los cuartos oscuro, 10 m² como mínimo. La altura del techo debía ser de 3,5 metros como mínimo. Era aconsejable una temperatura ambiente de 18°C en las habitaciones de rayos X. Si era posible, se debía colocar la fuente de alimentación de alta tensión en otra habitación diferente a la del tubo de rayos X.

Este capítulo está seguido de un tercero de 13 párrafos con recomendaciones relacionadas con la radioprotección en el trabajo con rayos X. Todavía no se indicaba ningún límite a las dosis: la unidad para la “dosis absorbida” no existía. El operador del aparato de rayos X no debía estar innecesariamente expuesto a la radiación X primaria (se daba por sobreentendido que a veces podía ser necesario). El operador debía mantenerse a la mayor distancia posible del tubo de rayos X utilizado. El blindaje debe ser lo suficientemente bueno como para que un ojo bien adaptado a la oscuridad no pudiera percibir fluorescencia alguna “apreciable” en una pantalla fluorescente que estuviera colocada donde el operador se encuentra normalmente. El tubo de rayos X debe estar envuelto de la manera más completa posible en un material cuya capacidad de protección se encuentre indicada en las recomendaciones.

En el trabajo con rayos X de diagnóstico, el operador debe estar protegido contra la radiación X dispersa mediante una pantalla protectora extra con capacidad de protección equivalente a 1 mm de plomo. En radioterapia el operador debe estar fuera de la sala de terapia, detrás de una pared con capacidad de protección equivalente como mínimo a 2 mm de plomo. Se recomienda para el trabajo radioscópico (en el que el radiólogo observa directamente una pantalla fluorescente detrás del paciente) que se realice lo más rápido posible y con el menor diafragma e intensidad de radiación posibles. El vidrio con óxido de plomo entre la pantalla fluorescente y el observador debería tener la misma capacidad protectora que el plomo que envuelve al tubo de rayos X (en la tabla se indican los espesores requeridos). En radioterapia debería existir un dispositivo de seguridad que imposibilite el uso del tubo röntgen sin filtro de metal para eliminar la radiación más blanda.

El cuarto capítulo está compuesto de cinco párrafos sobre protección contra la alta tensión eléctrica. El piso deberá estar cubierto por un material aislante, por ejemplo, madera, goma o linóleo. Las líneas de alta tensión permanentes deberán ser colocadas a tres metros sobre el piso como mínimo y estar diseñadas de forma tal que no den lugar a ningún efecto corona (es decir,

la descarga mediante ionización del aire circundante) Los componentes del equipo que no estén bajo tensión eléctrica deberán estar conectados a tierra. Los interruptores deberán ser rápidos y los fusibles eléctricos no deberán ser lentos. Un voltímetro debería indicar la alta tensión.

El último capítulo contiene nueve párrafos acerca del trabajo con radio, y cinco acerca del trabajo con radón. En un principio se estableció que la protección debía estar referida a la contaminación de las manos por radiación beta y la de todo el cuerpo por radiación gamma. La mejor protección para las manos era mantener suficiente distancia, por lo que era necesario utilizar pinzas largas, preferiblemente de madera, al manipular preparados de radio. Al transportarlo, el radio debía ser llevado en cajas con 1 cm de plomo alrededor del preparado como mínimo y con asas largas. Todos los trabajos debían realizarse en el plazo más breve posible.

Cuando el preparado de radio no se utilizaba, debía conservarse en un depósito a la mayor distancia posible del personal. En el depósito los preparados de hasta 100 miligramos debían estar dentro de un bloque de plomo de un espesor de 5 cm. Se debía contar con una habitación especial al poner juntos los aplicadores compuestos de varios preparados. Las mediciones debían realizarse en una habitación especial, en la que el radio solo debe encontrarse cuando éstas tuvieran lugar.

Las enfermeras y auxiliares de enfermería no deberían estar en la misma habitación que los pacientes durante el tratamiento. Todo el trabajo no calificado que se pueda aprender durante un período breve debe ser realizado por mano de obra temporaria, que no debe ser contratada para este trabajo durante períodos mayores de seis meses. Esto se aplicará en particular a las enfermeras y quienes ensamblan los aplicadores. Se debe dar especial atención al envío de sal de radio por correo.⁽⁵⁾ Si se tratara de pequeñas cantidades, el contenedor deberá estar revestido con 3 mm de plomo, como mínimo. Si se trataba de cantidades mayores, debían ser transportadas preferiblemente a mano en contenedores especiales.

En el subapartado acerca del radón se dijo que, al igual que con el radio, uno debía protegerse tanto contra la radiación beta como la gamma. También se recomendaba que el radón debiera ser manipulado en primer lugar en su “estado relativamente inactivo”. El radón no emite ni radiación beta ni gamma. Las primeras radiaciones de esa clase provienen del radio B (plomo-214) que tiene una actividad relativamente insignificante los primeros diez minutos. La radiación beta y gamma significativas proviene del radio C (bismuto-214), que después de 30 minutos solo alcanza una pequeña fracción de su intensidad máxima. Se advirtió contra la filtración de radón (denominada entonces “emanación”), y se recomendaba buena ventilación en la habitación donde se fabricaba el preparado. El radio del cual se extraía el radón para uso en cápsulas herméticas debía ser conservado en una habitación especial, separada de la “habitación de extracción”. El radio debía ser conservado preferiblemente en una caja de plomo con paredes cuyo espesor debían ser de aproximadamente 17 cm para una cantidad equivalente a aproximadamente 1 gramo, como era usual en estos casos.

Como ya se ha dicho, Rolf Sievert participó también de reuniones del International X-Ray Unit Committee (que luego sería el ICRU), resuelto en Londres en 1925 y al cual Manne Sieg-

(5) El preparado de radio mezclado con las cartas del correo podía ser algo preocupante, a pesar de que el riesgo de daños a terceros era muy pequeño. Sven Benner cuenta en su reseña histórica sobre la radiofísica sueca (1974) acerca del transporte por correo de agujas de radio y la nueva cámara de ionización de Sievert para mediciones de dosis de radiación a comienzos de la década de 1930: “Las pequeñas cámaras esféricas eran utilizadas, entre otras cosas, para mediciones de radiación por correo, probablemente las primeras en el mundo. Alguna que otra vez las cosas salían mal, como el día en que envié agujas de radio a Lund (no existían disposiciones contra esos envíos en esa época) y al día siguiente una cajita con las pequeñas cámaras. Por algún motivo el paquete con radio no fue retirado el día en que llegó y el otro envoltorio con las cámaras estuvo junto al que contenía el radio en la casilla de correos del hospital. Se tuvo que desechar esa medición.”

bahn y Sievert fueron convocados para integrarlo en 1926. A propuesta del comité ejecutivo del congreso se eligió a Siegbahn como presidente de ICRU,⁽⁶⁾ y los secretarios de honor fueron E.A. Owen y el radiólogo de Hamburgo *Hermann Holthusen* (1886—1971). El nuevo comité que debatiría sobre la unidad era significativamente mayor que el comité de radioprotección: Tenía nada menos que 24 miembros, lo cual muestra el gran interés que el tema de la unidad despertaba en esa época:

L. Arntzen	Dinamarca	H. Holthusen	Alemania
H. Behnken	Alemania	M. Nakaidzumi	Japón
R. T. Carreras	España	N. Nemenow	Unión Soviética
J. Grau Casas	España	E.A. Owen	Inglaterra
A. Dauvillier	Francia	M. Ponzio	Italia
W. Duane	EE.UU.	V. Posejpal	Checoslovaquia
E.C. Ernst	EE.UU.	E. Pugno-Vanoni	Italia
N.S. Finzi	Inglaterra	H.R. Schinz	Suiza
K. Gawalowski	Checoslovaquia	M. Siegbahn	Suecia
R. Gilbert	Suiza	R.M. Sievert	Suecia
H.M. Hansen	Dinamarca	F. Sluys	Bélgica
S.A. Heyerdahl	Noruega	I. Solomon	Francia

De todos ellos solo Holthusen y Sievert tendrían un papel importante en la evolución de la radioprotección después de la guerra. Tanto Sievert como Solomon eran miembros de ICRP e ICRU.

Las recomendaciones de 1928 de este comité fueron mucho más sucintas que las recomendaciones para la radioprotección. Tan solo 8 párrafos. Las tres primeras eran muy breves. Se recomendaba:

1. Que se apruebe una Unidad Internacional de radiación röntgen
2. Que esta Unidad Internacional sea la cantidad de radiación röntgen que, cuando los electrones secundarios han sido aprovechados al máximo y se haya evitado el efecto pantalla de la cámara de ionización, en un centímetro cúbico de aire a 0°C y una presión mercurial de 76 centímetros genera una conductividad tal que una unidad de carga electrostática puede ser medida en una corriente de saturación.
3. Que la Unidad Internacional de la radiación röntgen se indique con la letra “r”

La nueva unidad no fue por lo tanto una unidad para la dosis de radiación en el sentido actual, sino más bien una unidad para medir la capacidad de la radiación de ionizar el aire. Esta magnitud sería luego llamada “exposición”. Se puede afirmar que el equivalente más cercano entre las magnitudes físicas más comunes sea la densidad de flujo energético es decir, la cantidad de energía que penetra por unidad de superficie en el cuerpo irradiado. La exposición sería una medida directa de la densidad de flujo energético si la misma cantidad de energía por unidad de superficie siempre ionizara la misma cantidad de moléculas de aire, lo cual no es el caso. La elección de la exposición como magnitud se debió a que la ionización del aire era significativamente más sencilla de medir que el flujo energético o la energía que era absorbida en el cuerpo irradiado.

(6) De aquí en más utilizaré las actuales denominaciones ICRU e ICRP para los dos comités, a pesar de que los nuevos nombres recién se utilizaron a partir de 1950.

Sin embargo no se logró definir explícitamente qué magnitud física se consideraba “la cantidad de radiación X que...” Indirectamente se hablaba de la “dosis” (del inglés “dosage”) recomendando que el instrumento de medición debía ser denominado dosímetro (del inglés “dosage-meter”, en francés “dosimètre”, en alemán “Dosismesser”). La palabra dosis tiene aquí el mismo significado que en la medicina, del griego *dosis* que significa “acción de dar”. En radiación significa, en otras palabras, “cuánta radiación” se irradia al cuerpo en cada punto, medido mediante la ionización del aire como la radiación generada en un 1 cm³ de aire en ese punto.

Sin embargo había una diferencia importante con la dosis de un producto medicinal. Si el producto medicinal se ingiere por boca, se va a distribuir todas las veces de la misma manera en los diferentes órganos del cuerpo y cada dosis es una dosis para todo el cuerpo. Dos dosis iguales es por ello lo mismo que una dosis doble. La dosis de un producto medicinal es, al igual que la masa y la energía, una magnitud *extensiva* y esas magnitudes se pueden sumar.

La dosis de radiación, en tanto no se trate de todo el cuerpo es, al igual que la temperatura, una magnitud *intensiva*. Esas magnitudes no se pueden sumar (no se dice que han habido 75° C si un día la temperatura fue de 37° y el siguiente 38°). Las dosis de radiación pueden sumarse día a día si la dosis es válida para la misma parte del cuerpo durante todo el tiempo, pero si se ha irradiado una mano con 1 r y también un pie con 1 r, no se puede decir que “el cuerpo ha recibido 2 r”, ni siquiera que “la mano y el pie” han recibido 2 r, sino solo que cada uno de esas partes del cuerpo ha recibido 1 r.

En la actualidad al hablar de dosis de radiación nos referimos no a lo que se ha irradiado al cuerpo, sino a la energía que se ha absorbido por unidad de masa en la parte del cuerpo que ha sido irradiada. La unidad actual para la *dosis absorbida* es joule por kilogramo (J/kg), pero esta unidad ha recibido el nombre especial *gray* (Gy) cuando se trata de radiación ionizante.⁽⁷⁾ Calculado de manera global se puede decir que una exposición con 1 r da una dosis absorbida de algo menos de 0,01 Gy, es decir, 1 Gy equivale a un poco más de 100 r. Actualmente existen varios conceptos de dosis para propósitos relacionados con radioprotección y la unidad denominada *sievert* (Sv). Todavía no es momento de debatir esta cuestión. Basta con decir que 1 sievert de radiación X se obtiene con una dosis absorbida de 1 gray, y que 1 r es por ello más o menos equivalente a 10 milisieverts (mSv), una denominación común en la actualidad. Antes de que se introdujera la unidad gray, la unidad por dosis absorbida se llamaba *rad*, según la cual 1 rad = 0,01 Gy, de tal modo que una exposición con 1 r daba una dosis absorbida algo menor a 1 rad.

Debido a que la relación entre exposición y energía absorbida depende de la energía de los fotones en la radiación X, se constató que cada indicación de “dosis” sería incompleta si al mismo tiempo no se indicara la calidad de la radiación X. Se comprendió que la “calidad de la radiación” no era un término bien definido, pero se consideraba que podía ser suficiente con indicar la tensión máxima sobre el tubo röntgen y qué filtro y fuente de alta tensión se habían utilizado. En la práctica era suficiente con indicar el “Half-Value Layer (HVL)” de la radiación, es decir, el espesor de cobre o aluminio necesario para reducir “la cantidad de radiación” a la mitad. Con referencia a la evolución de los métodos de medición, pronto se consideró que las recomendaciones que se habían dado debían ser contempladas como provisionarias.

De esa manera se consideró que se habían realizado las tareas solicitadas a ambos comités, ICRP e ICRU, y todavía no existían planes de continuar con esas actividades. Sin embargo los comités contaban con ser revividos en el próximo congreso internacional de radiología. El Dr. Kaye recomendaba a los miembros del comité de radioprotección que debían intentar

(7) En honor al biofísico inglés *Harold Gray* (1905–1965)

organizar un trabajo de radioprotección nacional cuando arribaran a sus países. Lauriston Taylor tomó nota de este consejo y al llegar a su país se contactó con radiólogos y asociaciones radiológicas estadounidenses con la propuesta de crear un grupo consultivo para realizar este objetivo. El grupo se reunió por primera vez en West Baden, Indiana, al realizarse una reunión de la American Roentgen Ray Society. Taylor la relata de esta manera (véase la ref. Tayl 1980):

Todo comenzó de manera bastante borrosa y nunca me quedó claro qué nombre se le dio al comité consultivo para la protección de los rayos X y el radio, o a quién aconsejaría el comité. Después de un año comencé a ver que quizá había sido correcto no haber terminado con la tarea. La idea original era que siendo yo el representante de EE.UU. en la próxima reunión de ICRP, el grupo asesor me daría consejos respecto de cuáles debían ser las posturas que debía adoptar en dicho encuentro. Pero las numerosas sociedades radiológicas se enamoraron de la idea general: ellos también querían recibir consejos y participar en la cuestión. Acordamos que colaboraríamos también con las asociaciones radiológicas y cuando el comité fuera creado, estaría compuesto por miembros recomendados por los cuatro grupos médico-radiológicos del país, junto con fabricantes de aparatos de rayos X, cada uno representado por dos personas. Y así fue durante muchos años. Esos grupos consideraron al comité asesor como asesor de ellos. Luego surgió la cuestión de cómo manejaríamos esa cuestión. Bien, en esa época la radioprotección era parte de las tareas oficiales del Bureau of Standards. Era uno de los importes en el presupuesto (de 1926, creo) según el cual el Bureau of Standards destinaria "a mediciones de radiación y radioprotección" y se asignó un monto anual de 30000 dólares. Era una suma increíble para esa época. Lo cierto es que durante el primer año no pudimos gastar todo ese dinero.

Las sociedades radiológicas tomaron una actitud: "Taylor, tú que estás en Washington, el Bureau of Standards tiene una montaña de papeles con dinero destinado al trabajo con radiación. ¿Por qué no te ocupas del papeleo y el trabajo y funcionas como un secretario o algo así..." Las cosas comenzaron informalmente de esa manera. Luego, debo decirlo, el Bureau of Standards comenzó a preguntarse si éramos sus asesores. Entonces dejamos muy en claro que en realidad no éramos asesores del Bureau of Standards, éramos una organización que, excepto yo, estaba compuesta por gente que no pertenecía a organismos del gobierno. El Bureau of Standards podía hacer lo que quisiese con nuestras recomendaciones pero no pensábamos dejarnos enredar y tener deudas de agradecimiento con ningún organismo del gobierno. Todo terminó en una situación muy confusa, lo cual conllevó graves malentendidos ya que el Bureau of Standards continuó publicando nuestros informes como manuales del National Bureau of Standards, pero oficialmente significaba solamente que recibíamos dinero para las publicaciones y la distribución. He mencionado cómo comenzó este comité con una reunión en West Baden. La primera reunión oficial del comité, después de que éste se organizara, fue un año después, en septiembre de 1929. Creo que la reunión fue en Toronto, pero no recuerdo demasiado, ya que tuvimos un encuentro con nuestro comité asesor en cada una de las reuniones de la sociedad [de radiología].⁽⁸⁾

[...]

Dije que la primera reunión del nuevo comité "asesor" tuvo lugar en septiembre de 1929. W.D. Coolidge, que era uno de los miembros que representaba a las firmas de equipos röntgen, fue designado presidente. Él fue presidente durante esas dos reuniones pero después pensó que era mejor que me designaran a mí en ese cargo, ya que el gobierno pagaba la mayor parte del dinero

(8) Aquí Taylor recuerda mal el lugar. En su voluminoso libro acerca de ICRP, ICRU y NCRP dijo que la primera reunión tuvo lugar el miércoles 18 de septiembre de 1929 en el hotel Pensilvania de New York. Participaron de esa reunión W.D. Coolidge, G. Failla, R.R. Newell, H.K. Pancoast, L.S. Taylor, W.S. Werner y F.C. Wood.

destinado a estas cuestiones. Así se hizo y cuando las cosas se pusieron en marcha resultó muy difícil escabullirse. Eso lo saben muchos de ustedes por experiencia personal. Comenzamos con las reuniones formales en septiembre de 1929.

Las primeras recomendaciones del comité asesor (que de aquí en más llamaremos NCRP)⁽⁹⁾ se publicaron en la primavera de 1931, menos de dos años después de la primera reunión. Es una muestra de cuán sencilla era la vida en esa época: Se convocaba a un grupo de personas, se juntaban algunas ideas, se escribía un informe y se lo publicaba menos de dos años después: ¡una hazaña increíble!

En el informe se detallaba mucho más de lo que había hecho ICRP, y esa diferencia continuó hasta 1950. Los informes de ICRP era una especie de esqueleto que solo brindaba información sobre lo más importante, mientras que los informes de NCRP publicaban detalles significativos.”

En 1931 la Sociedad de Naciones creó un comité para estudiar los problemas relacionados con los riesgos de la radiación y la radioprotección, un antecesor del Comité Científico de Naciones Unidas sobre los Efectos de la Radiación Atómica (en inglés, UNSCEAR) que las Naciones Unidas crearían 24 años después. Dos radiólogos alemanes, *Hermann Wintz* (1887–1947) y *Walther Rump* recibieron la tarea de escribir un informe que ha quedado en el olvido: *Protective Measures Against Dangers Resulting from the Use of Radio, Roentgen, and Ultra-Violet Rays*. Es un informe bien redactado, fidedigno y exhaustivo de 114 páginas y fue publicado como informe de la Sociedad de Naciones CH-1054 en agosto de 1931. Puede afirmarse que se anticipó a su tiempo: Describía los problemas existentes, los conocimientos con los que no se contaba y qué política de protección se recomendaba. Lauriston Taylor lo definió como “absolutely superb” y consideró en 1978 que bien podría haber sido escrito en la actualidad. Estoy de acuerdo con Taylor.

Durante la década de 1930 se realizaron tres congresos internacionales de radiología: en París en 1931, en Zurich en 1934 y en Chicago en 1937. ICRP no tuvo actividad alguna durante los intervalos pero se realizaron reuniones cuando se organizaban congresos. La cantidad de miembros estaba al principio limitada a seis, ya que el italiano Ceresole parece no haber participado. No estuvo ni siquiera en Estocolmo en 1928. “No recuerdo haberlo visto jamás”, dijo Taylor. La cantidad de miembros se mantuvo baja debido a la mala experiencia con ICRU, que en Estocolmo en 1928 constó de 24 personas. Las reglas de ICRU de entonces permitían que cada país participara con dos personas en sus reuniones. En la reunión de ICRU en París en 1931 participaron 40 personas, de las cuales, según Taylor, solo entre 6 y 8 sabían algo sobre el tema en cuestión. Es obvio que un grupo que tenga esa composición no puede ser muy efectivo.

El 9 de junio de 1931 envié al Dr. Kaye la siguiente invitación a quienes participaron en la reunión de la ICRP en Estocolmo en 1928 (según la gran reseña histórica de Lauriston Taylor de 1979):

Se propone que el Comité Internacional de rayos X y Radio se reúna en París durante el Tercer Congreso Internacional de Radiología con el objeto de decidir cuáles son las modificaciones que sea necesario realizar, que deben introducirse a las Recomendaciones aprobadas en Estocolmo. Parece ser la opinión general que esas Recomendaciones han demostrado ser suficientes para el

(9) Actualmente denominado National Council on Radiation Protection and Measurements, antes conocido como US Advisory Committee on X-Ray and Radio Protection, luego National Committee on Radiation Protection and Measurement; NCRP ha sido durante mucho tiempo el equivalente estadounidense de ICRP.

propósito fijado y no se propone que se modifiquen en general. El propósito está más relacionado con los principios generales que con los detalles y se propone que si se desean más detalles, los mismos deben introducirse en las diferentes Recomendaciones complementarias que la mayoría de los países elaboran para adaptarlas a sus requerimientos específicos.

El comité se reunió en París con dos nuevos participantes: El Dr. *R. Ledoux-Lebard* de Francia (que por razones de cortesía fue presidente al igual que Sievert en su momento, cuando el comité se reunió en Suecia) y *E. Pugno-Vanoni*, profesor de física de radiaciones y electrotécnica de la universidad de Milán.⁽¹⁰⁾ Pugno-Vanoni reemplazó a Ceresole. Los otros participantes fueron Grossmann, Kaye, Melville, Sievert, Solomon y Taylor.

El resultado del encuentro fueron modificaciones insignificantes a las recomendaciones de 1928 y los siguientes textos añadidos de mayor importancia:

Quien trabaje con rayos X y en particular con radio deberá ser examinado por un médico de manera sistemática en términos generales y en lo que a la sangre se refiere. Dichos exámenes deberán ser realizados por profesionales calificados, al momento de comenzar el empleo y como mínimo dos veces por año. Esos estudios serán decisivos para determinar si se acepta su empleo o no, como así también el límite y finalización del empleo.

Esta fue la primera recomendación internacional sobre lo que serían luego los controvertidos exámenes médicos. La idea había sido en un principio que mediante estudios de la sangre se pudiera detectar a tiempo el comienzo de la destrucción de los órganos que producen la sangre. Durante la década de 1930 existían seguramente muchos que todavía trabajaban bajo tan malas condiciones de protección que el resultado se podía observar en los análisis de sangre. El motivo del examen previo al empleo era que se querían obtener valores de referencia para compararlos luego con una eventual reducción de esos valores. Otra de las razones era que los empleadores no querían emplear a nadie que tuviera un estado hemático u otras dolencias que pudieran indicar daños por radiación con la consiguiente indemnización.

El texto completo de las recomendaciones modificadas sobre radioprotección se encuentran en *Acta radiologica* **12** (1931), pág. 586—594. La reunión simultánea de ICRU en París no arribó a resultados importantes, quizá por el gran número de participantes. Sievert había intentado infructuosamente encontrar aceptación a una propuesta cuyo objeto era crear una nueva unidad para la intensidad de radiación del preparado de radio llamado “Imc”, correspondiente a “Intensity-milli-curie”, algo que había descripto en un artículo del *Acta radiologica* **12** [1931], pág. 300—304).

El año anterior al congreso de París la comisión internacional por el estándar del radio había ampliado la unidad curie para que se aplicara no solo al radón sino también a todos los productos de desintegración del radio. Sin embargo no se quería utilizar el curie para indicar la cantidad de sustancia radioactiva fuera de la cadena de desintegración del radio-226, por ejemplo, el mesotorio (radio-228) o el torón (radón-220). Para esos nucleidos se introdujo la unidad *rutherford* (rd), que sería la cantidad de nucleido radiactivo que decae con un millón de desintegraciones radioactivas por segundo. Todavía el curie y el rutherford medían la *cantidad* de sustancia radioactiva y solo indirectamente una medida de esa actividad, es decir, la cantidad de desintegraciones por segundo.

(10) Pugno-Vanoni, nacido en 1899, parece haber propuesto en 1928 la idea de una cámara condensador que luego realizaría Sievert, pero Sievert probablemente desconoció la propuesta de Pugno-Vanoni.

Si se quería saber la actividad de un curie de la sustancia, se podía partir por definición que era igual a la cantidad de desintegraciones radioactivas por segundo en un gramo de radio. La cantidad podía ser calculada directamente como $[(N_A/A) \cdot \ln 2]/T$ en la que T es el período de semidesintegración del radio-226 expresado en segundos ($5 \cdot 10^{10}$ s), N_A el número de Avogadro ($6,02214 \cdot 10^{23}$ mol⁻¹) y A el peso atómico, es decir, 226 para el radio-226. Si el período de semidesintegración se supone que sea de 1600 años, entonces un gramo de radio-226 tenía una actividad aproximada de 37 mil millones de desintegraciones por segundo (en la actualidad la unidad de desintegración recibe el nombre de “becquerel”⁽¹¹⁾).

La desventaja de definir 1 curie como la cantidad de un nucleído que tiene igual número de desintegraciones por segundo que un gramo de radio era que la cantidad calculada de desintegraciones por unidad de tiempo (“la actividad”) dependía de la última estimación del período de semidesintegración del radio. Por ello la comisión internacional por el estándar del radio recomendó en 1930 que se debía establecer un número exacto para la actividad equivalente a 1 curie (se propuso 37 mil millones de desintegraciones por segundo). Lamentablemente otra organización, la International Union of Physics and Chemistry recomendó en 1948 otro valor: 36 mil millones de desintegraciones por segundo. La confusión finalizó en 1950 cuando hubo acuerdo en establecer la cantidad en 37 mil millones de desintegraciones por segundo, que desde entonces es la definición de 1 curie. Por ello 1 curie de radio-226 ya no es más 1 gramo de radio con exactitud.

La unidad rutherford sobrevivió hasta el 6º congreso internacional de radiología en Copenhague en 1953, cuando se amplió el uso de la unidad curie para todas las sustancias radioactivas, tanto las artificiales como el nucleído padre radio-226. La evolución histórica pasó de la época en que se consideraba que 1 curie era la *cantidad* de radón que estaba en equilibrio radiactivo con un gramo de radio, a la actualidad en que pasamos primero al curie y luego al becquerel como medidas de la *actividad* de la sustancia radiactiva, es decir, la cantidad de desintegraciones radiactivas en un período de tiempo. El término original vive hasta nuestros días en el lenguaje cotidiano en expresiones tales como “un escape de 1 curie de yodo-131” o (lo que en la actualidad es lo mismo) “un escape de 37 mil millones de becquerel de yodo-131”, como si la actividad todavía fuera considerada como la cantidad de sustancia radiactiva que se emite. Puesto que la actividad es actualmente la cantidad de desintegraciones en el tiempo correspondiente se debería decir en su lugar “un escape de una cantidad de yodo-131, cuya actividad es de 1 curie” etc., pero eso es naturalmente complicado.

La cantidad real (peso) que equivale a cierta actividad, por ejemplo 1 curie (es decir, 37 mil millones de becquerel) o 1 becquerel, varía con el peso atómico (A) y el período de semidesintegración (T). Éste puede calcularse como $8,86 \times 10^{-17} A \cdot T$ kg/curie o $2,4 \cdot 10^{-27} A \cdot T$ kg/Bq si el período de semidesintegración T se indica en segundos⁽¹²⁾. El siguiente ejemplo es esclarecedor:

Nucleído	Per. de semidesint.	Peso 1 Ci	Peso 1 Bq
yodo-131	8,1 días:	8,1 microgramos	2,2 10^{-16} gramos
radio-226	1600 años	1 gramo	2,7 10^{-11} gramos
uranio-238	4,56 mil millones de años	3 toneladas	82 microgramos

La cantidad de materia para una actividad de 1 becquerel es, por lo tanto, muy pequeña.

Un paso fundamental acerca del conocimiento de los problemas y métodos de medición fue

(11) Nota del Revisor: Más exactamente, “en la actualidad la unidad de actividad se denomina becquerel y es igual a 1 desintegración por segundo”

(12) Nota del Revisor: y si el peso atómico A se expresa en kg

tomado en 1933 con la publicación del libro de texto *Grundlagen und Praxis der Röntgenstrahlendosierung*, escrito por Hermann Holthusen y R. Braun.

La siguiente reunión de ICRP, en Zurich en 1934, fue más importante que la de París, ya que por primera vez se recomendaba un valor límite para la dosis de radiación en el trabajo radiológico. Ya he mencionado antes propuestas semejantes de, entre otros, Mutscheller y Sievert acerca de una “dosis de tolerancia” expresada como 0.01 HED por mes o 0.1 HED por año. Antes de alcanzar el acuerdo acerca de la unidad “dosis” Röntgen (r) en Estocolmo en 1928, hubiera sido arriesgado traducir HED como “dosis” ya que existían muchas propuestas de unidades. Después de la reunión de la ICRU en Estocolmo se empezó a investigar cuántos Röntgen eran equivalentes a 1 HED y debido a eso se expresó la dosis límite en Röntgen en lugar de hacerlo en HED.

Ya en 1927 el radiólogo alemán *Hans Küstner* había estimado que 1 HED equivalía a aproximadamente 550 “röntgen” tal como él definió a la unidad. Durante 1933 el comité asesor estadounidense (NCRP) calculó que la estimación de Küstner también podía ser válida para el nuevo Röntgen de la ICRU pero redondeó el valor a 600 r. La estimación de Mutscheller de una dosis de tolerancia de 0,01 HED por mes equivalía por lo tanto a 6 r por mes. Se consideró luego 25 días laborales por mes y se arribó así a 0,24 r por día, que luego se redondeó en 0,1 r por día. Esto se hizo así en parte por ser cuidadoso (en el intercambio epistolar con Taylor, Mutscheller había propuesto que se debía partir de 4 r por mes, teniendo en cuenta que la dosis de tolerancia se aplicaría también a la radiación más blanda, por lo cual 1 HED equivalía a menos de 600 r), en parte porque se consideraba que la inseguridad era tan grande que incluso 0,2 r por día parecía demasiado exacta. El valor 0,1 r por día fue recomendado por NCRP en 1934. Equivalía a aproximadamente 250 milisieverts por año, lo cual puede compararse con el límite de dosis de 20 milisieverts que fue recomendado por ICRP en 1990 para la dosis anual promedio durante períodos de cinco años. La diferencia entre la dosis límite de entonces y la actual se explica porque en la década de 1930 no se calculaban los riesgos de cáncer o lesiones hereditarias. La dosis límite propuesta garantizaba la seguridad contra las lesiones conocidas en esa época y no reflejan necesariamente una menor ambición de protección.

Ante la reunión en Zurich, el Dr. Kaye envió el 10 abril de 1934 una carta a los miembros de ICRP casi en el mismo tenor que la carta que había enviado antes de la reunión en París en 1931, y el 28 de junio envió un resumen de las propuestas que recibió como respuesta. En el segundo escrito hacía referencia al comité como “la comisión”, un paso en dirección hacia el nombre actual. Kaye propuso que se añadiera el siguiente párrafo al comienzo de las recomendaciones (según la reseña histórica de Taylor):

Los conocimientos actuales indican que una persona con salud normal bajo condiciones normales de trabajo puede tolerar una exposición a la radiación röntgen de hasta 0,2 röntgen (r) internacionales por día. En caso de irradiación continua durante un día laboral de 7 horas ésta equivale a una tasa de dosis de 10-5 r por segundo. Los valores de protección que se indican en esas recomendaciones son acordes con este valor bajo condiciones de tipo medio. No se puede dar por ahora una dosis de tolerancia equivalente para la radiación gamma del radio.

La dosis de tolerancia de la recomendación de ICRP no fue tan fuertemente redondeada como el valor que NCRP indicaba (0,1 r por día) pero provenía de la misma información, es decir, aproximadamente 0,25 r por día, redondeada hacia abajo a 0,2 r por día (equivalente a aproximadamente 500 milisieverts por año en lugar de los actuales 20 milisieverts por año). La

necesidad de indicar una tasa de dosis equivalente¹³ provenía de la necesidad de poder indicar el requisito de blindaje. Si bien se hablaba de una “dosis de tolerancia”, estaba implícito que la dosis absorbida no podía superar los 0,25 r por día. El hecho de que no se eligiera un período mayor para el límite de la dosis (una semana o un año) se debió probablemente a que se suponía que para el trabajo radiológico médico un día era igual al otro.

La reunión en Zurich tuvo lugar el 26 de julio de 1934. De los miembros anteriores de ICRP estaban presentes Kaye, Pugno-Vanoni, Sievert, Solomon y Taylor. Stanley Melville había fallecido. Puesto que la reunión se realizaba en Suiza, se contaba con que se elegiría un presidente suizo, pero para sorpresa de todos llegó el Dr. Leboux-Lebard y dio por sentado que su presidencia ejercida en la reunión de París seguía vigente. Los suizos habían elegido simultáneamente dos presidentes honorarios, los profesores *R. Bar* y *F. Tank*. Ellos se mantenían firmes en la regla de ICRU, por la cual podían estar presentes dos representantes de cada país (a pesar de que esto no se consideraba aplicable a ICRP), lo cual significaba que dos suizos más estarían presentes.

El Dr. Grossmann había desaparecido. Asistió en su lugar *Hermann Behnken* (1889—1945). Behnken era responsable de las mediciones de radiación en el *Physikalisch Technische Reichsanstalt* de Berlín-Carlottenburg, y a fines de la década de 1920 había construido varias cámaras de ionización para la normalización de la medición de radiación X y era, por eso, una persona muy conocida. Taylor lo había visitado durante casi un mes en 1931. Behnken había sido oficial durante la I Guerra Mundial, algo que mencionaba frecuentemente con orgullo. Se quejaba ante Taylor de los financistas judíos que, según él, eran responsables de todos los problemas económicos e industriales de Alemania. Cuando Taylor volvió a reunirse con él en 1934, Behnken no ocultó su satisfacción ante las medidas que la conducción del país había tomado contra los judíos. Le mostró divertido al aterrizado Taylor un parque de juegos en el que los niños judíos se mantenían separados de los “arios” y se los obligaba a llevar una cinta amarilla. Le dijo a Taylor que reemplazaba a Grossmann en ICRP ya que Grossmann era judío y estaba involucrado en “actividades judías”.

Taylor conocía al matrimonio Grossmann y los consideraba personas agradables. Taylor comenzó a investigar para dar con su paradero. Pero en 1934 no era fácil: Alemania hervía después de la masacre de Röhm y la gente no veía con agrado las preguntas relacionadas con judíos. Nadie sabía nada sobre Grossmann o su mujer y Taylor notó que sus preguntas turbaban a los interrogados. Temía lo peor.

Era absurdo que 4/11 partes de la comisión estuviera compuesta por suizos y que las autoridades alemanas hubieran resuelto quién era “adecuado” para ICRP. Por ello se resolvió establecer las reglas de membresía con estatutos claros. Los nuevos estatutos establecían que la comisión estaría compuesta por un representante de cada país designado *por la comisión* y por un representante de cada laboratorio nacional invitado *por la comisión* para designarlo. Se ratificaba la posibilidad de ICRP de designar de manera relativamente independiente a sus miembros. Eso hizo que la comisión fuera muy efectiva pero también despertó muchas críticas.

Mientras se realizaba el congreso de radiología en Zurich, tuvo lugar una reunión del comité internacional por la luz en Sankt Moritz, Suiza. Puesto que el miembro del Bureau of Standards de este comité estaba impedido de asistir, se le pidió a Lauriston Taylor que participara del encuentro. Taylor ha escrito un vivo relato de su viaje:

13 Nota del Revisor: La frase “La necesidad de indicar una tasa de dosis equivalente” no debe interpretarse en términos de la magnitud *dosis equivalente*.

”... El medio de transporte normal era el tren, pero el Dr. Solomon de París había llegado en automóvil junto con su esposa y se ofreció para llevar a Kaye, su mujer y a mí a Sankt Moritz. Nunca habíamos viajado en coche con Solomon, y por eso agradecemos el ofrecimiento. Cinco millas más adelante nos empezamos a arrepentir. Tenía un automóvil grande, pesado, pero él era un verdadero salvaje al volante y debíamos recorrer caminos serpenteantes en los Alpes. Conducía a velocidades temerarias y nunca dudaba al tomar las curvas. Si se tiene en cuenta que era probable que hubiera italianos que condujeran tan salvajemente pero en dirección contraria, podrán comprender qué sentíamos después de una media docena de veces de estar cerca de un accidente. Cuando finalmente arribamos a Sankt Moritz, Kaye descendió del vehículo. Era un inglés alto y tranquilo. Se sentó al borde de la acera y rompió en llanto. Luego me dijo que nunca más viajaría en un coche conducido por un francés.

Taylor consideraba que ICRP no tenía motivo alguno para dedicarse a la radiación infrarroja o ultravioleta. Esta postura sobre la radiación no ionizada sigue existiendo desde entonces en el seno de ICRP.

Debido a las nuevas reglas de membresía, se resolvió en Zurich que ICRP contaría con los siguientes miembros:

R. Ledoux-Lebard	Francia (presidente)
G.W.C. Kaye	Inglaterra (secretario de honor)
H. Behnken	Alemania
E. Pugno-Vanoni	Italia
R. Sievert	Suecia
I. Solomon	Francia
F. Tank	Suiza
L.S. Taylor	EE.UU.

ICRP seguía sin tener actividad alguna entre reunión y reunión, si es que no se cuentan las preguntas que el enérgico Kaye enviaba a los miembros los meses previos a la siguiente reunión que se realizaría en relación con el 5º congreso internacional de radiología en Chicago en 1937. Una de las cuestiones que Kaye trataba en su carta a los miembros el 16 de febrero fue la protección de los operadores en el tratamiento a distancia con gramos de radio.

Las únicas propuestas a Kaye que están documentadas son las que le hicieron llegar Sievert y Taylor. La propuesta de Sievert no pudo ser incluida en la agenda de Kaye porque llegó tarde. Sievert consideraba que la unidad “r” no era adecuada para la radiodosimetría y recomendó la unidad “Imc” que había propuesto en 1931. Quizá resulte extraño que Sievert planteara esta cuestión en ICRP y no en ICRU. Era evidente que la definición de 1928 de un “Röntgen” solo estaba referida a la radiación X y que faltaba una unidad equivalente para la radiación gamma.

Sin embargo Kaye planteó la cuestión en ICRU, de la cual era miembro. Esto llevó a que ICRU modificara la definición de lo que ahora se llama “röntgen”, con r minúscula, en Chicago en 1937:

Un röntgen es la cantidad de radiación röntgen o gamma tal que la emisión de partículas asociadas es capaz de provocar, en 0,001293 gramos de aire, iones que transportan en total una unidad electrostática de carga de cada signo. Nótese que 0,001293 gramos es la masa de 1 cm³ de aire a 0°C y presión mercurial de 760 mm.

La denominación “r” de la unidad se mantuvo. Uno de los resultados de la nueva definición es que ya no había dudas de que la recomendación de una dosis de tolerancia de 0,2 r por día era aplicable también a la exposición a la radiación gamma del radio.

Después del congreso de Chicago, los nubarrones de la guerra volvieron a aparecer y pronto se desencadenaría la II Guerra Mundial. Ante la guerra y con el convencimiento que el trabajo de radioprotección internacional se interrumpiría durante un tiempo, Kaye (que moriría en 1941) tomó contacto con Lauriston Taylor y le pidió que funcionara como “presidente en disponibilidad” hasta que la situación volviera a la normalidad y el trabajo internacional pudiera reanudarse. Cuando eso se logró, solo quedaban Sievert y Taylor como miembros originarios de ICRP.

Taylor pensó primero que Grossmann, que había estado desaparecido desde 1933, había sido asesinado por los nazis al saber que era judío, pero luego se dijo que Grossmann había huido a Turquía. Sin embargo, en libros de referencia biográficos alemanes he encontrado otros datos sobre Grossmann que aumentan la curiosidad por saber qué es lo que realmente sucedió con él. Se dice que dejó su trabajo en Siemens “por razones personales” en 1932, pero sabemos por Taylor que el año correcto fue 1933, cuando Hitler llegó al poder. El último signo de vida que Taylor tuvo de Grossmann fue una carta del 23 de junio de 1933 (Hitler asumió como canciller el 30 de enero). En esos libros se menciona que Grossmann trabajaba como “investigador privado” en Alemania durante los años 1932–1942. Esas fuentes dicen que desarrolló un tomógrafo (aparato para reproducción por rayos X de determinadas capas del cuerpo) que fue comercializado en 1934 por Sanitas en Berlín, pero ese aporte es posible que lo haya realizado antes de dejar Siemens. El nombre de Grossmann se encuentra en la bibliografía mucho después. En la publicación *Strahlentherapie* de 1938 hay un artículo de un “Dr. G. Grossmann, Berlín-Zehlendorf” acerca de cómo debe presentarse el espectro de la radiación X. Propone allí que es mejor indicar la distribución de la intensidad de la radiación en función de la energía cuantizada que, como antes, en función de la longitud de onda.⁽¹⁴⁾

En 1942 Grossmann volvió a Budapest, lugar donde había nacido, según esos libros. Si eso es cierto, renació de las cenizas del fuego. Ese mismo año los alemanes exigieron a los húngaros que intensificaran sus medidas antisemitas y medio año más tarde el líder político Szálasi se convirtió en jefe de gobierno, las persecuciones contra los judíos finalizaron y Raoul Wallenberg comenzó su tarea salvando vidas. (nota del trad.: Raoul Wallenberg, diplomático sueco que salvó a miles de judíos húngaros del Holocausto. Fue arrestado por el gobierno soviético y falleció estando bajo su custodia. Su muerte es todavía hoy motivo de controversia). Pero Grossmann parece haber sobrevivido y forjado un futuro nuevo en sus últimos años. Los libros de referencia dicen que en 1954, a los 76 años, fue nombrado jefe de investigación del cáncer en Budapest. Un destino notable. Las informaciones dicen que habría fallecido en Budapest en 1957.

Otros libros dicen que Behnken “cayó en las batallas finales en Berlín”, es decir, en 1945, y la misma información repite *Robert Jaeger*, el colaborador de Behnken en el PTR que luego tuvo participación activa en ICRP. Behnken también debe haber tenido su costado bueno ya que Jaeger, que era enemigo de los nazis, se mantuvo leal a él. Los datos sobre su muerte en Berlín pueden ser motivo de cuestionamiento. Taylor me contó que fuentes escandinavas le dijeron que Behnken había sido matado por la resistencia en Noruega cuando conducía un grupo de ocupación.

(14) Cuando estaba trabajando y encontré este libro con el artículo de Grossmann de 1938 esto fue más interesante ya que yo escribí un artículo sobre la misma cuestión 15 años más tarde. En ese entonces no conocía el artículo de Grossmann y creía que era el primero en presentar esta propuesta. Mi artículo tuvo mayor impacto y es citado en algunos libros de textos conocidos, pero es evidente que el artículo olvidado de Grossmann fue publicado primero y se le debe reconocer el mérito correspondiente.

Pero probablemente sea demasiado tarde para saber la verdad acerca de Grossmann o Behnken.

Taylor dice que Solomon — quien también era judío — se salvó de los nazis pues murió en 1939, pero que su esposa, su hijo y su hija fueron asesinados por ellos. Melville había muerto antes de la reunión en Zurich de 1934. Pugno-Vanoni murió a fines de la década de 1940.

El congreso de radiología de Chicago fue el último en trece años. En 1939 se desencadenaba la II Guerra Mundial.

15| Las lesiones por radiación
y los rayos mortales

Si se tiene en cuenta que muchas personas sufrieron lesiones por la radiación X durante las primeras décadas posteriores al descubrimiento de Röntgen, sorprende que él no haya sufrido lesión alguna en su trabajo, sin tener conocimiento acerca de los riesgos que la radiación implicaba. Röntgen insinuó una explicación en su segunda publicación de marzo de 1896. Él cuenta que para proteger a sus sensibles aparatos de la molesta radiación, colocó dispositivos de medición y trabajó en una cabina de metal, parcialmente revestida con plomo.

No pasó demasiado tiempo antes de que se dieran a conocer informes sobre las lesiones causadas por la radiación. Las lesiones por radiación existieron incluso antes de que se descubriera la radiación X, ya que otros habían realizado experimentos con tubos de rayos catódicos antes que Röntgen. Emil Herman Grubbé experimentó en 1895 con el tubo de descarga de Crookes y en enero de 1896 sufrió eritema cutáneo. Grubbé falleció a los 85 años, en 1960, pero debió soportar cientos de operaciones en sus manos. Su propia enfermedad fue la que le dio la idea de intentar la radioterapia en un caso de cáncer de mama el 29 enero de 1896, aunque sin mayor éxito.

Wolfram Fuchs (el primero que quizá propuso recomendaciones para la radioprotección) afirmaba que las “quemaduras röntgen” no eran más peligrosas que las quemaduras comunes y agregó que “cuando los rayos röntgen impactan en el cráneo durante cierto tiempo, el pelo se cae pero vuelve a crecer sin efectos desagradables.”. Este efecto de la radiación X despertó pronto gran interés y fue un fenómeno que podía ser utilizado como indicador de que la exposición comenzaba a ser alta. La caída del pelo, *la depilación*, ocurre a partir de una dosis de 3 Gy (gray) (yo utilizo la unidad de dosis actual para facilitar las comparaciones). En otras épocas se utilizaba como tratamiento pediátrico de la tiña, una enfermedad causada por hongos parasitarios en los folículos pilosos. Se irradiaba la cabeza con rayos X en dosis absorbidas de hasta 3 Gy en la piel. Cuando el pelo se caía, desaparecían los hongos con él.

Cuanto mayor es la dosis absorbida, más tiempo tarda el pelo en crecer nuevamente y en dosis muy elevadas la caída del pelo es permanente. Es por eso que el pelo brinda cierta información sobre cuán alta ha sido la dosis absorbida en la piel.

Las dosis absorbidas mayores generan también otras lesiones, además de la caída del pelo. En dosis de radiación de 4–8 Gy aparece un lento enrojecimiento de la piel después de cuatro semanas posteriores a la irradiación. El retardo se explica porque muchas células no mueren directamente por la radiación pero se daña su capacidad de reproducción y no se generan nuevas células.

Fue justamente esta consecuencia de la irradiación la que utilizaron los radiólogos para establecer la dosificación de la radioterapia. A veces probaban métodos de tratamiento irradiando su propia piel hasta que ésta enrojecía para luego poder calcular cuánto tiempo necesitaban irradiar a un paciente al querer eliminar un tumor. El primer punto de referencia de la “dosis de radiación” era 1 HED, la dosis de eritema cutáneo.

Pronto se comprendió que la piel podía tolerar muchos más que 1 HED si se distribuye la radiación durante un período mayor de tiempo. Si se absorbe primero una dosis de $\frac{1}{2}$ HED y después de algunas semanas otra dosis de $\frac{1}{2}$ HED, la piel no presenta enrojecimiento. Las células parecen tener la capacidad de reparar parte de la lesión que había generado la primera dosis.

Magnus Strandqvist (1904–1978), jefe de servicio de radiología y luego profesor en el hospital Sahlgrenska de Gotemburgo, demostró en 1944 en una tesis notable (ver *Acta radiol. Suppl.* 55) que él podía deducir una relación empírica y matemática entre la dosis absorbida necesaria para un cierto grado de efectos cutáneos y el tiempo durante el cual la

radiación se difunde⁽¹⁾. Más tarde aparecieron fórmulas más sofisticadas (como la de Elli o la de Kirk⁽²⁾) para describir la relación entre el tiempo de irradiación y la cantidad de fracciones en las que se divide la dosis absorbida.

Si la dosis absorbida se aplica de una sola vez pero supera 1 HED (es decir, 4–8 Gy), el enrojecimiento de la piel se produce antes y el efecto cutáneo será más fuerte con una mayor dosis. Las dosis absorbidas comprendidas entre 10 y 20 Gy son seguidas de ampollas, eliminación de líquidos y ulceraciones. Si la dosis absorbida es de aproximadamente 20Gy, la probabilidad de que esas lesiones cicatricen dentro de un período de un mes y medio es del 50%, y la dosis puede por ello ser considerada como dosis de tolerancia de la piel para lesiones graves. En dosis mayores la necrosis es tan amplia que aparecen heridas de muy difícil cicatrización. La cicatrización se ve afectada por el daño causado a los vasos sanguíneos que dificulta el flujo sanguíneo. En el tejido irradiado pueden aparecer tumores cancerígenos.

Antes de la I Guerra Mundial se había logrado alcanzar una comprensión bastante clara sobre los riesgos de las lesiones que estaban limitadas a las partes superficiales del cuerpo, fundamentalmente manos y dedos. Aún no estaban disponibles otras fuentes de radiación que pudieran exponer a todo el cuerpo en poco tiempo a dosis absorbidas mortales. La radiación X que se utilizaba tenía intensidad y capacidad relativamente baja de penetración. Si todo el radio del mundo se hubiera podido acumular en un solo lugar, no habría alcanzado para generar dosis absorbidas mortales en una hora, si se encontraba a una distancia mayor a algunos metros. Pero la cantidad de lesiones graves en dedos y manos se incrementaba. Según el radiólogo estadounidense *Marshall Brucer*, el miedo a la radiación comenzó entre la población en 1905.

El 4 abril de 1936 se colocó una lápida en homenaje a los “mártires de la radiología” en el jardín del Hospital Saint Georg en Hamburgo. La iniciativa fue del profesor Hans Meyer, editor de la publicación *Strahlentherapie*. La lápida mostraba los nombres de 169 personas que durante el trabajo con la radiación X o el radio habían sufrido lesiones tan severas que les ocasionaron la muerte. Las biografías de esas personas fueron impresas en un libro editado como suplemento de *Strahlentherapie*.

Luego se sumaron muchos más nombres. En 1959 se publicó una segunda edición de las biografías de los mártires de la radiación bajo el nombre *Ehrenbuch der Röntgenologen und Radiologen aller Nationen*. El número de víctimas ya había ascendido a 359.

Los nombres incluidos en *Ehrenbuch* no constituyen una enumeración precisa. La lista incluye a aquellas personas que lograron adquirir cierto prestigio en su labor. Eso significa que la cantidad es probablemente mayor debido al número de enfermeras y asistentes cuyo destino no fue tan notorio. Por otro lado hay muchos nombres que quizá con un criterio examinador más crítico no deberían incluirse. Las personas anémicas fallecidas a los 80 años no son necesariamente mártires de la radiación. El libro es interesante aunque de triste lectura. Se puede obtener del mismo una estadística reveladora.

Las causas de muerte más comunes en *Ehrenbuch* son los graves efectos secundarios de las lesiones en manos y dedos y a veces también en la cabeza. En esas áreas lesionadas aparecía el cáncer y eran lesiones tan graves que había que amputar primero los dedos, y luego quizá un brazo. El cáncer podía eventualmente ser detenido, pero reaparecía generalmente con metástasis en los ganglios linfáticos axilares. Las lesiones causaban gran sufrimiento pero algunos de los afectados parecen haber continuado heroicamente con sus tareas laborales.

Ehrenbuch es de lectura densa y no vamos a detenernos innecesariamente en su triste con-

(1) Nota del Revisor: Más precisamente, “... el tiempo durante el cual se irradia”

(2) Véase F. Ellis *Clin. Radol.* 20 (1969), pág. 1-7; J. Kirk *et al. Clin. Radiol.* 23 (1972), pág. 344-350.

tenido. Pero la primera época de lesiones graves por radiación fue trágica y no daríamos un cuadro real de la evolución si no ofreciéramos una cabal comprensión de las consecuencias de la radiación X por actitudes negligentes en la radioprotección. Sin embargo voy a relatar algunas descripciones de esos casos:

La hermana Blandina, conocida en este mundo bajo el nombre de Maria Ridder, nació el 4 de mayo de 1871 en Anreppen, Kreis Düren (Renania), y trabajó desde 1898 como jefa de enfermería en la nueva sala de rayos X del hospital Bardenheuer de Colonia, Alemania. Ignorante de los peligros relacionados de la radiación X, la hermana Blandina trabajó en un primer momento con las manos desprotegidas, sosteniendo firmemente a los pacientes, principalmente a los niños, para lograr buenas imágenes, que en ese tiempo requerían de largos períodos de exposición. La capacidad de penetración de la radiación la probaba sosteniendo su propia mano delante de la pantalla de platinocianuro.

Después de un año y medio de trabajo se sorprendió ante la inflamación de las manos y el enrojecimiento de la piel. Pronto apareció una inflamación cutánea generalizada seguida de ampollas y pus en las manos, en particular en la izquierda. Los cambios en la piel se extendieron también a los antebrazos. El tratamiento con ungüentos y baños fue infructuoso.

Los dolores eran insostenibles y las pruebas de tejido mostraron después la aparición de cáncer. Los dedos más afectados de la mano izquierda debieron ser amputados. Después de algunos meses se vieron obligados a amputar la mano izquierda a la altura de la muñeca y también el pulgar de la mano derecha. Esas operaciones tampoco detuvieron la grave enfermedad. Fue necesario amputar el brazo izquierdo en 1909 hasta la mitad de la parte superior del mismo.

Con la ayuda de una prótesis y con cuatro dedos en la mano derecha, la hermana Blandina trabajó con gran habilidad y seriedad científica en la sala fotográfica del Instituto Röntgen, tomando fotografías, copias y diapositivas de muchas lesiones sufridas durante la I Guerra Mundial.

A fines de 1915 la hermana Blandina se quejaba de sensaciones agudas de ahogo. La radioscopia mostró un sombreado uniforme en toda la parte izquierda del pecho. El muñón del brazo izquierdo se hinchó rápida y violentamente. Sufrió tanto por los dolores que ella misma pidió que se le amputara el muñón, algo que el cirujano no podía hacer. Luego apareció una gran herida que cubría la mitad izquierda del pecho y la espalda. La hermana Blandina estuvo sentada durante meses, apoyada en almohadones, erguida en la cama, y falleció finalmente el 22 de octubre de 1916.

A pesar de que la hermana Blandina estaba discapacitada para utilizar sus manos debido a las numerosas intervenciones quirúrgicas a la que fue sometida, continuó trabajando con dedicación con los rayos X y solo sus insistentes súplicas lograron convencer a todos para que no fuera trasladada a otra sala. El autor trabajó con ella en la sala de rayos X durante muchos años y pudo certificar por sus propias observaciones que ella llevó su dolencia con serenidad heroica y paciencia admirable. Su destino trágico llevó a que todos los médicos y enfermeras que trabajaron en la sala de rayos X con ella, prestaran especial atención a la exposición de los rayos X.

Otra causa común de muerte en “Ehrenbuch” fue la *anemia aplásica*, la enfermedad que mataría a Marie Curie bajo circunstancias que señalarían a la radiación como la causante de su enfermedad. En esos casos hay una destrucción importante del sistema hematopoyético, con lo que estos sistemas dejan de funcionar con normalidad.

Rolf Sievert afirmó lo siguiente en una conferencia que tuvo lugar durante la década de 1960:

La baja intensidad de la radiación con la que se trabajaba en esa época [es decir, a comienzos de siglo] disminuyó en cierta medida los riesgos de lesiones, si se compara con aquellas que podrían producirse con las altas intensidades utilizadas en la actualidad. Si a esto le sumamos el hecho de que la radiación era utilizada en sus comienzos principalmente por médicos, encontraremos el motivo por el cual la cantidad de lesiones causadas por la radiación no fue mayor. Un estudio publicado sobre los pioneros del diagnóstico con rayos X que sufrieron graves lesiones debido a la radiación, frecuentemente con desenlace fatal, da una triste imagen de la insuficiente radioprotección de esa época. Tenemos muchos motivos para estar agradecidos por el uso de la energía atómica en un momento en que son bien conocidos los riesgos en el trabajo con radiación ionizante.

En su vasto libro *The trail of the invisible Light*, Grigg da muestra del resultado de un profundo estudio de la periodicidad de los primeros casos fatales como consecuencia de la radiación. La siguiente lista muestra el primer caso fatal que según él tuvo lugar en los diferentes países que se mencionan:

Alemania	1900	Friedrich Claussen
Inglaterra	1902	Barry Blacken
EE.UU.	1904	C.M. Dally (asistente de Edison)
Francia	1905	Jules Rhens
Italia	1912	Emilio Tiraboschi
Suiza	1913	Henri Simon
Australia	1913	J.F. Clandinnen
Chile	1915	Eckwall (según Grigg, fisioterapeuta sueco)
Hungría	1918	Julio deus Schröder
España	1919	Felipe Cariazo
Finlandia	1920	Anna Lönnbeck
Dinamarca	1922	J.F. Fischer
Japón	1923	Schichiro Hida
Unión Soviética	1925	Peter Baumgarten
Checoslovaquia	1925	Rudolf Backer
Israel	1925	Josef Freud
Austria	1931	Alois Czepa
Portugal	1935	Carlos dos Santes
Yugoslavia	1939	B. Bressan
Polonia	1950	Robert Bernhardt

Como se ve, ni Suecia ni Noruega forman parte de esta lista macabra, ya sea por la casualidad o gracias a la buena radioprotección. Nuestro radioterapeuta de fama mundial, Elis Berven, puede, probablemente, pertenecer a este grupo. Él falleció en 1966 de cáncer y sus dedos habían sido atacados en su totalidad por la radiación. Berven era uno de los que probó los métodos de tratamiento en su propia piel. Probablemente pueda pertenecer a esta lista algún otro caso, como consecuencia de la anemia entre las enfermeras suecas que trabajaban con rayos X.

Todas las lesiones (excepto las de cáncer de piel) que he contado se basan en la destrucción de un gran número de células, ya que el tejido afectado deja de funcionar. Pero para destruir tantas células es necesaria una dosis absorbida suficientemente alta. Las dosis absorbidas más

bajas también matan células, pero no las suficientes. Se dice que existe un umbral de la dosis absorbida que se debe superar para que tenga lugar la lesión. El hecho de que una célula en particular sea destruida o no, bien puede estar determinado por el azar. Es como si alguien corriera en un pequeño lugar y disparara en todas direcciones al azar. Es el azar el que establece quién será alcanzado por las balas. Si son pocos los disparos, quizá algunos individuos mueran, pero la sociedad puede seguir funcionando. Si el loco sigue disparando, finalmente el nivel de daño será tal que hará que la sociedad colapse.

En las dosis absorbidas altas se destruyen tantas células que la lesión es inevitable. Estas lesiones se denominan *deterministas*. El grado de gravedad de la lesión determinista, por ejemplo, en la piel, aumenta con la dosis absorbida ya que se destruyen más células cuanto mayor sea dicha dosis.

La existencia de un umbral de dosis absorbida era decisiva para la elección de la estrategia de radioprotección. Todas las dosis absorbidas bajas podían no ser importantes, si no fueran tantas que juntas superaran el umbral. También se podía decir que la situación era “completamente segura” si ninguna dosis absorbida superaba el umbral. Al indicar un límite de dosis con buen margen para el umbral y verificar que dicho límite no fuera sobrepasado, se podía impedir la aparición de lesiones deterministas.

Sin embargo había nubes preocupantes en el horizonte. El descubrimiento de Hermann Muller en 1927 según el cual la radiación X podía generar mutaciones, es decir, cambios cromosómicos señalaban un mecanismo lesivo que no exigía una cierta cantidad de células afectadas, y por eso no se podía suponer la existencia de ningún umbral. La lesión al azar de un gameto que actuara en una fecundación y diera lugar a un nuevo individuo se presentaría al azar, no solo a nivel celular sino a nivel del individuo. Después comenzarían las especulaciones acerca de si el cáncer también podría tener su origen en lesiones en células del cuerpo, es decir, las células *somáticas*. Si así fuera, el cáncer, al igual que las lesiones hereditarias causadas por la radiación, no sería una consecuencia de una irradiación inevitable, determinista sino que también dependería del azar. Esas lesiones al azar fueron llamadas con el tiempo *estocásticas* (del griego *stokastikos* = perteneciente a la conjetura).

¿Pero qué se podía hacer desde el punto de vista de la radioprotección con las lesiones que no tenían ningún umbral para la dosis absorbida? La estadounidense NCRP que recomendó en 1934 una dosis límite de 0,1 r (rad) por día, comenzó a fines de la década de 1930 a pensar en tener en cuenta el posible riesgo genético. Esto dio lugar a que Failla, quien ahora tenía un papel más importante en el diseño de la política de radioprotección, le escribiera una carta a Taylor en junio de 1941:

Creo que esto es un error por los siguientes motivos: 0,1 röntgen por día es ciertamente una dosis segura, en lo referido a las lesiones en el sistema. Si introducimos el criterio genético no existe ningún límite y 0,2 röntgen por día es tan arbitrario como 0,1 röntgen por día. Cuanto menor sea la dosis, menor será el daño genético, pero la posible lesión provocada por 0,1 röntgen por día es tan insignificante que bien podemos dejarla allí.

En contraste con los razonamientos de quienes analizaban la radioprotección pensando cómo protegerse contra los riesgos más elevados que causaban lesiones macabras, los medios de comunicación especulaban en la década de 1930 con los “rayos mortales”. Quizá se había llegado lo suficientemente lejos desde la I Guerra Mundial como para no sentir al miedo solo como algo negativo. La tensión y el temor por lo desconocido quizá comenzaban a tener valor como

factor de entretenimiento. Quizá existía en el fondo un sentimiento vertiginoso de preocupación tras la década de 1920, libre de penurias, y la llegada de la depresión de 1930 y las crisis mundiales. Pero, ¿por qué especular? Un diario de la época habla por sí mismo:

Hace algunos años se le dio una importancia desmesurada a un ingeniero inglés apellidado Matthews. Le había hecho saber al mundo que albergaba en su laboratorio fuerzas capaces de matar a todo ser viviente a muchas millas de distancia. Los periodistas asediaron el laboratorio, pero el inventor no estaba dispuesto a descubrir el velo de la cabeza de la Gorgona.⁽³⁾ Él mantuvo negociaciones con el gobierno inglés acerca de <el rayo mortal> y no pudo ni quiso decir nada. Sin embargo el gobierno notificó que no estaba interesado y finalmente se realizó una demostración. ¡Fue un fiasco! “El rayo mortal” no estaba en condiciones de matar ni siquiera a una rata a un par de metros de distancia. Después no se escuchó más acerca de Matthew pero sí sobre “el rayo mortal”. El hombre había sido presa de los sentidos, y los narradores de aventuras y profetas aprovecharon hasta saciarse con el episodio. Ahora sabemos todo acerca del “rayo mortal”. La cuestión es solo saber si existe.

El 26 de diciembre de 1933 el periódico sueco *Nya Dagligt Allehanda* publicaba el siguiente artículo bajo el título “Fuerza radiactiva mística descubierta por profesor inglés”:

Hace poco se realizó una sensacional demostración en Inglaterra de una hasta ahora desconocida fuerza radiactiva mística. Los nuevos rayos fueron descubiertos por el profesor O.A. Newell, jefe del departamento de atención sanitaria del sistema inglés de salud pública. El profesor informa que los rayos pueden describirse como un arma terrible en épocas de guerra y un instrumento para salvar muchas vidas humanas y fomentar la producción agrícola en épocas de paz. Los rayos estarían en condiciones de crear posibilidades de desarrollo de bacilos, los cuales provocan enfermedades mortales. Esos bacilos parecen eliminar todo rastro de vida dentro de las áreas a las que estén dirigidos. Seres humanos, animales y plantas mueren si son expuestos a la acción de estos temibles rayos. Pero al mismo tiempo, según el profesor, puede neutralizar todos los males que amenazan a la agricultura en todo el mundo, allí donde antes no existía vida.

En la demostración de los místicos rayos del profesor Newell había representantes del ejército y la fuerza aérea, junto con un número de investigadores científicos de diferentes universidades. Los rayos son “inalámbricos” y se generan con ayuda de bacilos que se encuentran en pacientes con diferentes enfermedades mortales, según afirma el profesor. Los rayos que son emitidos por esas personas enfermas son lo suficientemente fuertes como para generar una fuerte reacción en el galvanómetro eléctrico. Esas emanaciones radiactivas fueron cuidadosamente medidas al igual que su longitud de onda, luego de lo cual fueron regeneradas y transmitidas tal como las emisiones de radio comunes. La primera enfermedad que se logró provocar fue el ántrax. Luego el experimento continuó con el resultado mencionado anteriormente.

Personal voluntario del ejército y la fuerza aérea está a disposición de los nuevos experimentos que se vayan a realizar. El personal permitió ser portador de enfermedades más o menos peligrosas para poder confirmar la experiencia del profesor Newell.

Los expertos militares habrían llegado a obtener un resultado que indicaría que un ejército podría ser detenido si existiera el medio para emitir rayos suficientes contra ese ataque. Sin embargo parece que los descubrimientos carecen de algo para ser perfectos.

La fina ironía que surge de la última oración se puede tomar como una confirmación de que

(3) La “cabeza de la Gorgona” es la cabeza decapitada de Medusa, una de las tres gorgonas. Su mirada petrificaba a quien la viera.

el autor del artículo era consciente de estar publicando una historia que generaba miedo. Muchos lectores comprendieron seguramente lo mismo, pero algunos se dejaron asustar por el periodista deshonesto (deshonesto en tanto el autor del artículo, sabiendo de qué se trataba, dio la impresión de que la nota era cierta). El 6 junio de 1934 el periódico *Nya Dagligt Allehandan* realizó un nuevo esfuerzo en convencer a sus lectores sobre la existencia de los rayos mortales, esta vez haciendo referencia a un telegrama proveniente de Omaha, Nebraska:

El gobierno estadounidense ha prohibido todas las demostraciones públicas y experimentos con los así llamados “rayos de la muerte”, que según se informa, destruirían todo tipo de vida y desintegrarían la sangre de todo ser vivo. Algunas demostraciones que tendrían lugar en el congreso científico, reunido aquí, debieron ser canceladas. La prensa estadounidense y la opinión pública han seguido los experimentos realizados hasta ahora con gran interés. Sin embargo en el congreso varios científicos habrían informado a quienes estaban presentes acerca de los “rayos mortales”, realizados por un científico, el Dr. Longoria. En esos experimentos él utilizó un aparato con forma de tubo. Los rayos que emitía el aparato habrían matado inmediatamente a los animales de experimentación, entre ellos perros, gatos, conejos, a pesar de que la irradiación tuvo lugar a varios cientos de metros de distancia. Cuando se estudió a los animales muertos, se constató que su sangre estaba descompuesta. El mismo efecto fue constatado en palomas que cayeron muertas al suelo después de haber sido expuestas a la radiación, también a varios cientos de metros de distancia.

Hoy sabemos que se trataba de un pato. En 1934 no existían condiciones técnicas para transferir radiación mortal a grandes distancias. Pero el lector de esa época no podía estar seguro de que los investigadores militares no hubieran descubierto algo nuevo. Recién en la guerra mundial que estaba por venir se demostró que el arsenal militar no tenía radiación mortal. La fisión del átomo era en ese entonces algo más increíble que los misteriosos rayos mortales.

Es posible que muchos inventores con iniciativa pero sin suficiente información pensaran que era posible utilizar la radiación gamma del radio como rayo mortal con propósitos bélicos. Si hubieran sabido más, podrían haber calculado la cantidad total de radio que se había producido en forma pura en 1934: Se necesitarían en total 760 gramos para irradiar a una persona durante cientos de horas y darle una dosis mortal a 10 metros de distancia. Es probable que tampoco conocieran la ley de la inversa del cuadrado que dice que el tiempo necesario a 100 metros de distancia debe ser de 10000 horas⁽⁴⁾, es decir, más de un año, y durante un tiempo tan prolongado la radiación es, además, menos efectiva.

Todo lo que había para leer acerca de “los rayos de la muerte” en los periódicos a fines de la década de 1930 y comienzos de la de 1940 (antes de que el bombardeo de Hiroshima y Nagasaki hiciera que la realidad fuera peor que la ficción) no eran locuras. En el periódico sueco *Aftonbladet* se publicó el 1 de agosto de 1940 un artículo inteligente sobre los rayos de la muerte escrito por *Carl-Bertil Holmberg*. El autor escribió que el profesor *Abraham Esau* de Jena, un físico innovador en la producción de radiación electromagnética de corta longitud de onda, había matado ratas y ratones con su radiación. Esa radiación es la que hoy utilizamos en los hornos de microondas y el efecto en los animales era simplemente que los calentaba. Holmberg escribió: “En EE.UU., donde todo se hace en gran escala, se logró de esa manera masacrar a perros, monos y hasta un toro. La última víctima mencionada murió sin embargo

(4) Nota del Revisor: Según la ley de la inversa del cuadrado de la distancia, se necesitan 10.000 horas de irradiación a 100 metros de distancia de una fuente puntual de radiación, para obtener la misma dosis que durante una exposición de 1 hora a 1 metro de distancia de dicha fuente

después de aproximadamente 90 segundos. Como se ve, esos rayos no tienen un efecto mortal instantáneo, pero elevan la temperatura de la sangre y generan ciertos cambios fisiológicos que llevan bastante rápido hacia la muerte.” El deseo del profesor Esau lo convertiría luego en uno de los personajes principales en los esfuerzos alemanes por producir una bomba atómica.

Sin embargo, la radiación de onda corta era solo efectiva a corta distancia y no a cientos de metros como se afirmaba. Holmberg continúa relatando otras alternativas a los rayos de la muerte, por ejemplo, los rayos catódicos del profesor Lenard, que se pueden obtener de un tubo de descarga mediante una delgada ventana que “al instante mata a pequeños animales, como ser las moscas que pasen por su camino”. Pero los rayos catódicos tampoco tenían suficiente alcance para merecer el nombre de rayos de la muerte. Resta un tipo de radiación, las ondas sonoras de muy alta frecuencia, el *ultrasonido*. Esas ondas sonoras podían destruir glóbulos pero tampoco tenían suficiente alcance.

La fascinación por los “rayos de la muerte” no es nada especial. La gente siempre ha encontrado algo de que preocuparse. Cuando no fueron cosas concretas, tales como la guerra y las plagas, siempre ha encontrado otras fuentes de preocupación. La radiación es una de ellas por su invisibilidad y propiedades peligrosas. El miedo a la radiación comenzó en 1905 (popularmente se habla de “psicosis” pero no es la palabra adecuada). Pero también otras cosas han despertado temor, además de la radiación. Hemos vivido la preocupación por el producto Hormoslyr y el mercurio. Y a comienzos de siglo por el arsénico. La preocupación puede ser fundada y lleva a adoptar las necesarias medidas sanitarias pero también puede ser dolorosa y dañina. Para el lego no es sencillo establecer si esa preocupación está justificada. En el caso del arsénico a comienzos de siglo lo estaba en cierta medida: El colorante rico en arsénico *schweinfurtergrönt* se encontraba en el empapelado de los hogares, los cortinados y las prendas de vestir. La preocupación por los rayos de la muerte no estaba justificada.

16 | Los peligros del radio y el radón

Mientras el radio comenzaba a estar al servicio del hombre como la cura de todos los males, comenzó a ser evidente que la radiación que daba vida también podía conllevar la muerte. De hecho y gracias a su efecto mortífero sobre los tumores malignos, el radio y la radioterapia con rayos X daban esperanza de vida. En radiología estaba claro desde un principio que aquello que la radioterapia generaba sobre los tumores en el cuerpo eran⁽¹⁾ las lesiones que la radiación generaba matando células en la piel. En esos casos la intensidad de la radiación era mayor, ya que la piel se encontraba más cerca de la fuente de radiación y se perdía muy poca energía radiante a través de la absorción y la diseminación en los tejidos entre la piel y el tumor. Las lesiones por radiación en los primeros años, de aquellos que trabajaban con radiación X y radio, eran también lesiones cutáneas.

Lo que desde un principio era evidente para los radiólogos no lo era para el público en general. La imagen del radio como dador de vida estaba grabada en la opinión pública. Pero esa imagen quedó destruida en 1954. Cuando Radiohemmet recibió la primera entrega de una fuente poderosa de radiación artificial compuesta por cobalto-60, *Rune Walstam* (que sucedería en el cargo a Rolf Sievert como profesor de radiofísica en Estocolmo) y yo viajamos a Stadsgården para ver el momento en que se descargaba la gran caja transportadora del barco. Cuando llegamos la caja ya estaba en el muelle y sobre ella estaba sentado un pequeño grupo de estibadores. Explicamos que no era bueno sentarse sobre esa caja porque parte de la radiación se podía escapar. Les mostramos unos carteles de advertencia que estaban sobre ella. “¡Pero es por eso que estamos sentados sobre la caja!”, respondieron los estibadores. — “¡El radio da vida!”

Las propiedades perjudiciales de la radiactividad natural eran conocidas mucho antes de que Becquerel descubriera el fenómeno. La historia comienza en el siglo XV en Erzgebirge (“La montaña de mineral”) en la frontera entre la República Checa y Alemania. Allí se fundó en 1481 la ciudad minera Schneeberg, lugar donde se encontró mineral de plata. En 1516 se encontraron también yacimientos ricos en plata del otro lado de la frontera, lo cual dio lugar a la fundación de otra ciudad minera, Jáchymov (“Sankt Joachimstal”) en la actual República Checa.

Diez años más tarde, un joven alemán fue empleado como médico de la ciudad, *Georg Bauer* (1494–1555). Bauer es conocido bajo la forma latinizada de su nombre: *Georgius Agricola*. Había estudiado medicina en Leipzig e Italia, pero gracias a su actividad en Jáchymov se interesó en las ciencias relacionadas con la minería y ha sido llamado el padre de la mineralogía y la metalurgia. Es más conocido por su gran obra *De re metallica*, publicada un año después de su muerte. En el sexto libro de su obra, Agricola escribió sobre las relaciones laborales en las minas de plata:

[...] el polvo tiene propiedades corrosivas, corroe los pulmones y provoca tisis en el cuerpo [...]
Hay mujeres que se han casado con siete hombres, todos fallecidos a edad temprana por la terrible tisis.

Los mineros llamaban a la enfermedad “mal de montaña” (“Bergsucht”), y le echaban la culpa de la enfermedad a enanos malvados que vivían bajo la tierra. Un contemporáneo de Agricola tenía otra opinión. Se trataba de un suizo llamado *Theophrastus von Hohenheim* (1493–1541), más conocido como *Paracelsus*, cuyo significado hace referencia a que sus conocimientos superaron los del escritor romano *Celso*. El escritor había vivido en la época del emperador Tiberio y fue el autor de la obra *De Medicina*, compuesta por ocho tomos. Paracel-

(1) Nota del Revisor: era de naturaleza similar a

sus era médico y filósofo y tuvo gran influencia en el conocimiento del arte de curar. Veía al cuerpo humano como un laboratorio químico y a las enfermedades como una consecuencia de disfunciones químicas. Consideraba que el mal de montaña era causado por la inhalación de vapor de metal depositado en los pulmones. Pero, ¿qué clase de “vapores” eran esos?

Agrícola creía que se trataba más de polvo que de vapores. Encontró el método para ventilar las galerías de las minas con la ayuda de un ingenioso sistema de fuelles que funcionaban gracias a los caballos o la energía hidráulica. Alentó a las mujeres para que fabricaran un barbijo protector de malla fina para sus maridos.

Pasarían dos siglos antes de que estos conocimientos fueran ampliamente conocidos y para entonces hacía tiempo que se había extraído toda la plata de esas minas. Los nuevos conocimientos llegarían de la mano de *Martin Klaproth* (1743–1817), un farmacéutico y luego profesor de química en Berlín. Klaproth estaba interesado en la mineralogía y analizó el mineral negro de Jáchymov, el mismo que hoy llamamos pechblenda (en alemán, “Pechblende”, en inglés “pitchblende”). En 1789 descubrió el óxido de un elemento hasta entonces desconocido. Bajo la influencia del descubrimiento realizado ocho años antes de un planeta nuevo bautizado como Urano, Klaproth bautizó al nuevo elemento con el nombre de Uranium (en sueco, “uran”, en español, “uranio”). El primero en producir uranio en forma pura fue el francés *Eugène Peligot* en París en 1841. Klaproth descubrió después varios elementos: El zirconio (1789), el titanio (1792), el estroncio (1793) y el cerio (1803).

Becquerel descubrió luego que el uranio era radiactivo. Marie Curie descubrió el radio, y las cadenas de desintegración radiactiva fueron investigadas. Cada uno de los tres elementos radiactivos más importantes, es decir, el uranio, el radio y el radón, fueron ampliamente utilizados, para bien y para mal.

El mal de montaña siguió siendo un misterio durante mucho tiempo. Después del descubrimiento de Klaproth, se comprendió que al agregar uranio al vidrio se obtenían colores raros. La industria del vidrio de Bohemia utilizó esto y así se hicieron famosas las marcas “amarillo-Anna” y “verde-Anna” (en honor al nombre de la esposa del fabricante de vidrio *Josef Riedl*). Por esa razón la explotación minera se reestableció en Jáchymov en 1840, y luego de los avances de Marie Curie creció la demanda de pechblenda y uranio. La popularidad del radio llevó a realizar estudios profundos de sus propiedades y se estableció un instituto de radio en Jáchymov, donde un hombre llamado *August Pirchan* fue médico jefe en 1926.

Pirchan observó que el mal de montaña seguía cobrándose víctimas. Las cuestiones jurídicas impidieron que se pudiera realizar la autopsia de los mineros para poder estudiar la naturaleza del mal de montaña, pero cuando un empleado en el Instituto de Radio contrajo esa enfermedad, Pirchan diagnosticó que se trataba de cáncer de pulmón y lo confirmó después de examinarlo. Pirchan decidió realizar exámenes médicos a los mineros jubilados y descubrió que muchos de ellos estaban sumamente enfermos. En 1929 obtuvo el permiso para realizar la autopsia a 13 mineros fallecidos y descubrió que 9 de ellos tenían cáncer de pulmón. Restaba ahora establecer la causa, que a todas luces era la inhalación de polvo conteniendo productos de la desintegración radiactiva del radón. Transcurrirían algunas décadas más antes de que se pudieran establecer cuantitativamente esas relaciones.

Los efectos perjudiciales para la salud causados por el uranio fueron observados desde un primer momento. *Christian Gmelin* (1792–1860), de la universidad de Tübingen, describió en 1824 en su *Handbuch der Chemie* el resultado de experimentos con sales de uranio en perros y conejos. Su conclusión fue que el uranio era levemente tóxico si se ingería, pero mortal si era inyectado por vía intravenosa.

El uranio se hizo popular entre los médicos y homeópatas de fines del siglo XIX y el preparado de uranio se vendió durante mucho tiempo en las farmacias. El libro *Handbuch der Pharmaceutischen Praxis* de Hager incluía en 1930 un “Vin urané” compuesto por una parte de nitrato de uranilo y cincuenta partes de glicerol en 1000 partes de vino tinto. Pero finalmente *Torald Sollman* exhortó en su *Manual of Pharmacology* en 1936 que se abandonara el uso medicinal de las sales de uranio.

Lamentablemente existía en ese entonces mucho curanderismo. El uso profesional se basaba en el hecho evidente de que la radiación de las sustancias radiactivas mataba células y por ello podían destruir tejidos tumorales. El uso menos científico se basaba en efectos más dudosos. En lo que se refiere al radón, debemos mencionar dos observaciones. Se había notado que los mineros de Jáchymov rara vez padecían de reumatismo (que se murieran de cáncer de pulmón era otra cuestión); y también se había prestado atención al agua de las fuentes de manantial de aguas medicinales, cuyos efectos positivos se lograban al beberla en la fuente de las mismas. Si se embotellaba y consumía mucho tiempo después, el efecto no era el mismo. Ambas observaciones apoyaban la suposición de que el radón tenía efectos positivos para la salud.

Estaba de moda inspirar radón. Un número de fabricantes ofrecían “inhaladores” gracias a los cuales se podía inhalar el radón que emanaba de una solución de sal de radio, comúnmente bromuro de radio. Se investigó el porcentaje de radio y radón de las fuentes de agua mineral natural y se comenzaron a anunciar los porcentajes de radón. Se crearon baños en Jáchymov en 1906 en aquellos lugares donde el porcentaje de radón era más alto. Los baños de Gastein, con sus 18 fuentes cálidas al sur de Salzburgo en Austria, eran conocidos desde el medioevo, pero tuvieron su período de grandeza gracias al radón. Un centenar de “hoteles spa” (llamados así en honor a la localidad balnearia Spa, en Bélgica) ofrecía baños medicinales en el sótano y agua caliente en las habitaciones, provenientes directamente de las fuentes de agua termal, para poder inhalar allí el “saludable” radón liberado. A fines de la década de 1930 Hermann Göring permitió por motivos oscuros establecer galerías bajo el terreno de los baños de Gastein; algunos afirman que lo hizo con la esperanza de encontrar oro. Otros dicen que fue para conservar los tesoros artísticos. Más tarde se encontraron altos porcentajes de radón, lo cual generó el desarrollo comercial de “Heilstollen”, un túnel con 20000 m³ de aire caliente con alto porcentaje de radón. Se construyeron vagones especiales para introducir a los pacientes en estaciones de tratamiento con camas de aire a diferentes temperaturas y porcentajes de radón. En Austria todavía se considera saludable a este tratamiento, mientras que en otros países se lo ha abandonado, teniendo en cuenta el riesgo de radiación.

En 1952 se describieron los efectos saludables del radón en un artículo publicado en la revista *Life*. El artículo atrajo a miles de reumáticos hacia las minas abandonadas para inhalar el buscado radón. Los “spas” crecieron en muchos lugares de EE.UU. y algunos todavía continúan ofreciendo sus servicios, como por ejemplo el de Hot Springs en Arkansas, “la saludable mina de la viuda alegre” en Montana y en el mismo estado, la Sunshine Radon Health Mine. Según *Catherine Caufield* todavía se promete la cura de enfermedades tales como “artritis, sinusitis, migraña, eczema, asma, rinitis alérgica, psoriasis, alergias, diabetes, etc.”

Durante la década de 1960 se embotelló el agua de esas “fuentes de salud” y en muchas botellas de agua mineral se indicaba los porcentajes de radón expresados en la unidad Mache (véase el cap. 11). En 1920 existió un dentífrico llamado “Radiogen” que contenía radio, y se afirmaba que prevenía el sarro gracias al radón.

También el radio (radio-226) y el mesotorio (radio-228) se comercializaron de una manera irresponsable. Los paños con radio o tratados con ese elemento se colocaban sobre el cuerpo.

El lodo radiactivo se utilizaba en baños de lodo. Todo esto servía para embaucar inocentemente a la gente. En EE.UU. se vendía “Aqua Radio” al público hasta la década de 1930. Aún peor fue el producto medicinal patentado bajo el nombre de “Radithor”, fabricado durante la década de 1920 por Bailey Radio Laboratories de New Jersey. La empresa era administrada por *William J.A. Bailey* (1884–1949), proveniente de una familia pobre de Boston que por razones económicas se vio obligado a interrumpir los estudios que había comenzado en Harvard en 1903. Bailey afirmó luego que había obtenido un título en Harvard y un doctorado en Viena pero nada de eso era cierto. A fines de la década de 1910 fue demandado y condenado por estafa. Su interés en los elementos radiactivos había comenzado en 1921, cuando Marie Curie realizó un viaje a través de los Estados Unidos. Constituyó una empresa en Nueva York llamada “Associated Radio Chemists, Inc.” que vendía productos medicinales patentados conteniendo radio, tales como “Dax” (contra la tos), “Clax” (contra la gripe) y “Arium” (contra el metabolismo deficiente). Sin embargo las actividades se paralizaron rápidamente cuando las autoridades anunciaron la estafa publicitaria.

Después de crear un par de empresas nuevas similares en Nueva York y lograr publicidad, Bailey se trasladó a East Orange en Nueva Jersey, donde abrió los “Bailey Radio Laboratories” y comenzó a comercializar Radithor. La empresa vendía una pequeña botella con aproximadamente 1 a 1,5 dl de una sustancia que contenía un microcurie (37 000 becquerels) de radio-226 y radio-228 respectivamente. Bailey enviaba folletos publicitarios a todos los médicos registrados en EE.UU. y se hizo millonario. Entre 1925 y 1930 vendió 400.000 botellas con el milagroso producto que prometía curar los dolores estomacales, la hipertensión, la impotencia y otras 150 enfermedades.

El uso de Radithor provocó lesiones. Una sola botella del producto contenía más de 20 veces la ingesta anual de radioisótopos permitidos según las primeras recomendaciones internacionales para la protección de aquellos que trabajaban con radio. Pero algunos usuarios tomaban varias botellas por día. Durante la década de 1920 no había recomendaciones que limitaran la ingesta de radio.

El caso más sorprendente fue el de *Eben M. Byers* (1880–1932). Byers era un conocido millonario que tenía viviendas no solo en Nueva York sino también en Pittsburgh, Rhode Island y South Carolina, además de establos para carreras de caballos tanto en Nueva York como en Inglaterra. Era un deportista de gran vigor, exitoso tirador y había sido campeón amateur estadounidense de golf en 1907. El deporte fue el que indirectamente lo convirtió en víctima del Radithor. Todo comenzó con un tren contratado para asistir a un evento deportivo. Después de un festejo nocturno, cayó de su cama y se lesionó en el brazo. La lesión fue tan seria que afectó su capacidad para jugar al golf. Ningún médico logró ayudarlo. Alguien le recomendó que probara Radithor.

En diciembre de 1927 Byers comenzó a tomar varias botellas al día y se sentía fuerte y rejuvenecido. Estaba tan satisfecho con el resultado que envió Radithor a sus amigos y hasta permitió que sus caballos de carrera lo probaran. Entre 1927 y 1931 bebió más de 1000 botellas. El radio se acumulaba en su esqueleto y se calcula que la dosis absorbida en los tejidos óseos fue durante 1931 de 10 gray de radiación α .

El curanderismo con radio no fue la única causa de las lesiones radiactivas durante la década de 1920. Hubo una serie de hechos trágicos que afectó a un importante número de mujeres que trabajaban con pintura luminiscente radiactiva. La investigación de esos hechos obligó a las autoridades estadounidenses a intervenir en el abuso del radio. Después de fuertes campañas de las organizaciones de consumidores en 1928, las autoridades sanitarias aplicaron las recomendaciones que aconsejaban exámenes médicos rutinarios a los trabajadores en contac-

to con el radio y que buscaran un lugar diferente para lavarse. La Federal Trade Commission resolvió investigar las promesas de Bailey acerca del Radithor. El 5 de febrero de 1930 se presentó una denuncia contra Bailey por publicidad engañosa y por haber descrito al Radithor como producto inofensivo.

Al mismo tiempo Byers comenzó a padecer dolores y le dijo a su médico que la sensación de rejuvenecimiento había desaparecido. Comenzó a perder peso y se quejaba de dolores de cabeza y de muelas. Comenzó a preocuparse seriamente cuando se cayeron sus dientes. Al ser examinado por expertos, estos determinaron que los síntomas eran semejantes a los de las trabajadoras que estaban en contacto con pintura luminiscente. En septiembre de 1931 Byers fue citado como testigo en una investigación del comité de asuntos comerciales. Como estaba muy enfermo, el comité envió al abogado *Robert H. Winn* a su domicilio en Long Island para tomarle declaración. Winn describió luego esa visita (según R.M. Macklis, ver referencia bibliográfica):

Es difícil imaginarse una experiencia más atroz en un entorno tan magnífico. Viajamos hasta Southhampton a la grandiosa residencia de Byers. Allí lo encontramos en un estado que desafía cualquier descripción que pueda imaginarse. A pesar de ser un hombre joven y despierto, apenas podía hablar. Su cabeza estaba envuelta en un vendaje. Había superado con éxito dos operaciones de mandíbulas. Le faltaban casi todos los dientes. Todo el tejido óseo de su cuerpo estaba desintegrándose lentamente y había aparecido un agujero en su cráneo.

El 19 de diciembre de 1931 el comité prohibió a Bailey Radio Laboratories que continuara comercializando Radithor. Byers murió a los 52 años en la mañana del 31 de marzo de 1932. Pesaba entonces tan solo 42 kilos. Su muerte hizo que la Food and Drug Administration asumiera más responsabilidades. Diferentes asociaciones médicas condenaron los productos medicinales radiactivos, que desaparecieron rápidamente. Se difundieron las recomendaciones acerca de los valores límites para la ingesta de radio.

Bailey no fue acusado por la muerte de Byers y se negó a aceptar que el producto Radithor había sido la causa del deceso. Afirmó que había tomado más Radithor que nadie. Durante el resto de su vida realizó diferentes actividades: Escribió libros sobre política y salud, fue aviador de reconocimiento durante la II Guerra Mundial, descubrió un método para enseñar a nadar a los soldados e instrumentos para descubrir submarinos. Murió a los 64 años en 1949 de cáncer de vejiga.

La historia de las trabajadoras de pintura luminosa es todavía más trágica que el destino de Byers, pero quien causó la desgracia era mucho más inocente y más responsable que William Bailey. Fue un austriaco llamado *Sabin A. Sohocky* (1882–1926) que había estudiado medicina en Moscú antes de la guerra. Tuvo la idea de construir un indicador de escalas visibles en la oscuridad para instrumentos, pintados con pintura luminiscente activada por el radio. El método había sido utilizado por primera vez en submarinos alemanes durante la I Guerra Mundial.

Sohocky llegó luego a EE.UU. donde participó en la fundación de la empresa Radio Luminous Materials Company, que luego sería rebautizada como US Radio Corporation. La empresa tenía su sede en West Orange, Nueva Jersey, cerca del laboratorio donde Edison había fabricado su fluoroscopio y Clarence Dally había sido dañado por la radiación. Se comenzaron a fabricar esferas de reloj y manecillas pintadas con pintura luminiscente radiactiva que contenía sulfuro de zinc. Sohocky denominó al producto “Undark” y proyectó visiones futuristas: “Sin duda llegará el momento en que la habitación de su hogar estará iluminada exclusivamente con radio. [...] La luz proveniente de la pintura radiactiva de las paredes y el techo será como la suave luz de la luna.”

Las profecías de Sohocky no eran las únicas. La pintura luminiscente radiactiva había desafiado la imaginación de muchos escritores de novelas de aventuras. Uno de los más conocidos, *Edgar Rice Burroughs* (1875–1950), el hombre que creó a Tarzán, produjo en 1920 una serie de novelas sobre John Carter, el gran capitán de Marte que utilizaba con frecuencia al radio como fuente de luz:

Ahora está más claro. El terráqueo se dio cuenta que debía estar en una de las grutas subterráneas del palacio. La débil luz provenía de una lámpara de radio fosforescente que se utiliza en todo Marte como fuente de luz.

Sohocky fue primero director técnico y luego jefe de fábrica. Allí se fabricaban no solo las esferas de reloj sino también crucifijos fosforescentes e interruptores para lámparas. Cuando EE.UU. ingresó en la guerra en 1917 la actividad se amplió y se construyeron instrumentos para la aviación y miras telescópicas. Más de 250 obreras realizaban sus tareas en largas filas de bancos de trabajo. Eran en su mayoría mujeres y niñas jóvenes de hasta 12 años y no tenían la menor idea de los peligros que afrontaban. Al contrario. Se divertían de vez en cuando pintándose las uñas de las manos y los pies con pintura luminiscente para causar impresión en la oscuridad.

No era el trabajo en sí lo que implicaba riesgos sino el método especial que las mismas trabajadoras habían desarrollado. Uno de los físicos que luego se dedicó a investigar las condiciones, *Robley Evans*, las describió así:

Cuando pintaban los números en un pequeño reloj, se esforzaban por imitarlos con sombras que tuvieran un estilo profesional. Los números 2, 3, 6 y 8 eran los más difíciles, ya que las líneas finas que contrastaban con la pincelada gruesa hacían que los resultados no fueran los esperados, aún utilizando los más finos pinceles. Para corregir esas líneas gruesas se limpiaba el pincel y se lo utilizaba como goma de borrar para eliminar la pintura superflua. Las trabajadoras consideraban que los dedos eran demasiado gruesos, al igual que las telas como para afinar esos pinceles y entonces los limpiaban pasándolos por los labios y encontrando el grosor buscado.

Cada vez que introducían el pincel entre los labios ingerían una cantidad insignificante de radio, pero cada trabajadora pintaba cientos de cuadros de reloj e instrumentos por día y podían llevarse el pincel a la boca miles de veces, día tras día, año tras año. Solo en Estados Unidos existían alrededor de 50 fábricas de pintura luminiscente que daban trabajo a más de 2000 obreros. Durante 1920 se fabricaron allí 4 millones de esferas de reloj con pintura luminiscente radiactiva, pero también señuelos para pesca, ojos de muñecas, miras para armas y productos luminosos que se adherían a cualquier superficie para ser visibles en la oscuridad: desde enchufes hasta picaportes.

Catherine Caufield describe en su libro *Multiple exposures* todos estos productos. He utilizado su obra como fuente de información al relatar la tragedia de la pintura luminiscente. Durante los primeros años de la década de 1920 murió un número de obreras que trabajaban con pintura luminiscente pero no existía ningún motivo evidente que justificara esas muertes. En los certificados de defunción se mencionaban todo tipo de causas: úlceras, sífilis, intoxicación con fósforo, anemia y necrosis mandibular. Un médico y odontólogo famoso de Nueva York, *Theodore Blum*, dio un paso para esclarecer estos casos en el otoño de 1923: examinó la mandíbula de una obrera que se había infectado. Cuando Blum supo en qué consistía su trabajo,

pensó en la posibilidad de que la pintura luminiscente fuera la causa de sus problemas. Cuando Blum publicó un artículo en septiembre de 1924 acerca de la cirugía de la cavidad bucal en el *Journal of the American Dental Association*, mencionó en un pie de página una nota donde describió el caso de la pintura luminiscente y las molestias que sufrían las obreras “causadas por algún elemento radiactivo utilizado en la fabricación de esferas de reloj luminiscentes”.

Este sencillo comentario permitió comenzar a descubrir las causas de lo que estaba sucediendo. El artículo fue leído por el Dr. *Harrison Martland*, médico de distrito del condado de Essex, lugar donde se encontraba la empresa US Radio Corporation. Martland dedicaría 20 años de su vida para investigar qué había afectado a las obreras de la pintura luminiscente y todo debido a esa breve nota a pie de página. Su primera decisión fue intentar realizar la autopsia a la próxima obrera que falleciese y averiguar qué había sucedido en realidad.

El número elevado de muertes entre esas obreras no pasó desapercibido. Tanto US Radio como la Dirección local de Salud Pública resolvieron investigar la cuestión. US Radio lo hizo en silencio en marzo de 1924, solicitándoles a algunos investigadores de la Harvard School of Public Health que estudiaran estos casos. A pesar de que la compañía aseguraba que el radio era inofensivo, se instruyó a los capataces para evitar que las obreras lamieran sus pinceles. La Dirección de Salud Pública solicitó a la asociación de consumidores de New Jersey que analizara la situación laboral. El grupo que visitó la fábrica estableció que las condiciones laborales eran buenas y la Dirección de Inspecciones de New Jersey, que también realizó un control, coincidió con esa apreciación. Pero los investigadores de Harvard establecieron que las obreras estaban contaminadas con la pintura luminiscente y que el nivel de radiación gamma de la fábrica velaba los paquetes cerrados que contenían película para radiografías dentales en un lapso de dos o tres días. Ninguna muestra de sangre de las 22 empleadas dio resultados normales.

Los investigadores de Harvard informaron su hallazgo a la empresa US Radio en junio de 1924, y afirmaron que “parece inevitable considerar que las lesiones descritas fueron causadas por el radio”. US Radio desestimó el informe y prohibió su publicación bajo amenazas de iniciar una demanda.

A pesar de que no se había encontrado motivo alguno para advertir las relaciones laborales existentes en el establecimiento, la asociación de consumidores sospechaba que algo estaba mal y contactó a la organización nacional de consumidores para que la aconsejara. Se le solicitó al Dr. *Frederick Hoffman*, estadista de la empresa de seguros Prudential Life Insurance Company, que realizara su propio estudio. Hoffman informó luego el resultado en la asamblea anual de la American Medical Association (AMA) en mayo de 1925. La cantidad de enfermos y fallecidos era demasiado elevada como para que se trate de una simple coincidencia, afirmó Hoffman: “Estamos lidiando con una enfermedad profesional completamente nueva, causada probablemente por intoxicación con radio.”

Los investigadores de Harvard habían solicitado a la empresa US Radio que también presentara su informe en dicha asamblea anual, y lo fundamentaron explicando que la empresa tendría un mejor pasar si demostraba que se preocupaba seriamente por el problema. Sin embargo US Radio se negó y continuó afirmando que las cantidades de radio eran demasiado pequeñas como para provocar daños. La misma respuesta recibió el Dr. Martland cuando mantuvo correspondencia epistolar con US Radio.

Martland tuvo la oportunidad de examinar a dos obreras enfermas que pronto fallecerían durante la primavera de 1925. Solicitó permiso para practicar las autopsias de los cuerpos y tuvo la ayuda de Sohocky, que dejó la empresa US Radio donde trabajaba desde su fundación, debido a lo que estaba sucediendo. Martland y Sohocky descubrieron que los cuerpos de las

dos mujeres muertas, contenían grandes cantidades de radio, principalmente en el esqueleto. En un artículo publicado en *American Journal of Cáncer* en 1931, Martland presentó un informe detallado de sus observaciones. Los estudios de 18 obreras muertas demostraron que tenían entre 10 y 180 microgramos de radio en el esqueleto.

A pesar de los intentos de US Radio de oscurecer y minimizar el problema, los hechos empezaron a salir a la luz. El 10 de marzo de 1925 el *New York Times* publicó una noticia acerca de la primera obrera que solicitó una indemnización por daños a US Radio. Esa misma primavera murió el químico de US Radio *Edwin Lehman*, de anemia aplásica, la misma enfermedad que mataría a Marie Curie. Los periódicos escribieron cada vez más sobre los destinos de las desafortunadas trabajadoras y sobre las demandas de indemnización que afrontó US Radio. Ya que los investigadores de Harvard no le habían dado a la empresa lo que ella esperaba, ésta decidió dirigirse desesperadamente a un nuevo consultor, el Dr. *Frederick Flinn* de la universidad de Columbia, un especialista en higiene laboral. Flinn informó en diciembre de 1926 que “no existían riesgos laborales en la pintura de las esferas luminiscentes de reloj”. Recién en 1928 admitió que se había equivocado.

Las mujeres que solicitaron indemnización tuvieron que hacer frente a problemas jurídicos. US Radio quería defenderse afirmando que no existían pruebas sobre la relación de la causa en el hecho. Sus abogados siguieron otra estrategia: señalaron una resolución donde decían que la indemnización por lesiones en el trabajo solo se pagaría si la demanda se presentaba dentro de los dos años posteriores a la aparición de la enfermedad. Esto despertó protestas en la opinión pública y los medios: ¿Cómo podría realizarse una demanda e indemnización dentro de ese período de tiempo, cuando las lesiones tardan años en aparecer y ser descubiertas? Los procesos judiciales tardaron varios años en resolverse en ciertos casos. El caso que logró mayor publicidad fue el de “Las cinco condenadas a muerte”. Se trataba de cinco ex-empleadas de US Radio que demandaban a la empresa en forma conjunta. Las cinco presentaban terribles lesiones. Una de ellas había sido sometida a 20 operaciones de mandíbula y tenía las piernas paralizadas por las lesiones en la columna vertebral. Estaban tan lesionadas que debían ser llevadas al juzgado en andas, y una de ellas no podía siquiera levantar la mano para prestar el juramento de rigor. Luego de un largo proceso, US Radio aceptó un acuerdo “por razones humanitarias” pero negó toda responsabilidad jurídica.

Martland cuidó a Sohocky durante sus últimos años. El hombre tenía tanto radio en su cuerpo que el aire que espiraba convertía en fluorescente a una pantalla de sulfuro de zinc. Sus mandíbulas y sus manos estaban destrozadas por la radiación pero la causa inmediata de la muerte fue la anemia aplásica.

Durante sus estudios, Martland y sus colaboradores descubrieron que el radio que ingresa al cuerpo no se secretaba directamente tal como se creía. En su lugar el radio va al esqueleto de la misma manera que el calcio, lo que puede generar tumores. Por la irradiación de la médula puede afectar la producción sanguínea. Estos conocimientos serían utilizados diez años después, cuando se comenzaron a manipular elementos radiactivos artificiales.

Martland descubrió que las obreras que trabajaron con pintura luminosa no fueron las únicas afectadas por el radio. El radio había sido utilizado en miles de pacientes con la esperanza de curar diferentes enfermedades, desde reumatismo hasta esquizofrenia. Cabe mencionar los intentos por tratar la esquizofrenia con cientos de microgramos de radio-226 en el Elgin State Hospital de Illinois en una treintena de pacientes en 1931: “Estudios anteriores acerca de la velocidad de depuración, las vías de depuración y la depuración total del radio en el cuerpo nos convencieron de que nuestra dosificación era inofensiva. Por eso estábamos seguros de que no afectaría la

salud de los pacientes.” Era la ignorancia y la falta de conocimientos los que hablaban.

En los Estados Unidos fueron sancionados varios de esos tratamientos de la AMA (nota del traductor: American Medical Association) hasta 1932. De esa radioterapia se extrajo una conclusión interesante: Parecía que el primer síntoma de intoxicación con radio, al igual que en el caso Byers, era un mayor bienestar que pronto se convertiría en lesiones incurables.

Los conocimientos sobre la peligrosidad del radio hasta la década de 1930 fueron también utilizados en situaciones menos dramáticas. Es el caso de las novelas de aventuras. La más famosa de la década de 1920 fue escrita por el británico *Cyril McNeile* (1888—1937) bajo el seudónimo de Sapper con un héroe llamado Bulldog Drummond. Rolf Sievert y muchos otros leyeron con entusiasmo los libros de Sapper. Un autor sueco de similares características fue el barón *Axel Klinckowström* (1867—1936), apodado “Klinckan”, que además de novelas de aventuras escribió relatos de viajes y poesía. El escritor también había estudiado ciencias naturales: Había sido docente de zoología en la Escuela de Estudios Superiores de Estocolmo. Klinckowström escribió en 1926 la novela *La tijera de oro*, un relato de aventuras en el que el héroe, el cónsul Jonas Viborg (un hombre verdaderamente insoportable), tiene que vérselas con la reina criminal y diabólica Irma Brand (La “mala” de Sapper también se llamaba Irma). Al igual que Bulldog Drummond, el cónsul Viborg tiene el apoyo de un grupo de jóvenes semi-fascistas vestidos con uniformes de fusileros.

Sin sospechar nada, el cónsul Viborg se sienta a la mesa como anfitrión de una buena cena, cuando de repente uno de los invitados, el barón Fabian Klewenhüller, se levanta y le da un golpe en la cabeza. El cónsul cae inconsciente en la silla. El hijo del cónsul Vyborg, que afortunadamente estaba estudiando la carrera de odontólogo, tiene en su bolsillo una oportuna tenaza. Se horroriza, pero el barón ruge y le dice:

¡El segundo premolar de la mandíbula superior, la que tiene el empaste nuevo! ¡Diablos, no te quedes allí con la boca abierta: se trata de la vida de tu padre!

Se quemó un fusible y la habitación quedó a oscuras. El sagaz barón había observado que el escarbadiantes del barón, adornado con una piedra preciosa, emitía “una luminiscencia verdosa” cada vez que se lo llevaba a la boca. El barón pensó que esto se debía, naturalmente, a la satánica Irma Brand, que había sobornado al odontólogo del cónsul, rellenando uno de sus dientes con sal de radio.

El cónsul sintió el sudor frío en sus sienes...

¿Radio?

El barón asintió:

— Así es, radio. Ni más ni menos. Si no me equivoco, está en este diente, debajo del empaste de oro. Por quince mil coronas, no menos, la mejor sal de radio del mundo. Si pudiera liberarse a voluntad, podría hacer rodar a tu Packard dando vuelta tras vuelta por todo el mundo o hacer volar esta casa en el aire.

— Año tras año, siglo tras siglo, este empaste de radio emitirá su fuerza viva en forma de rayos, rayos que harían brillar a los diamantes en la oscuridad, como pequeños soles, y las células vivas del cuerpo humano a languidecer y morir...

— Fabian, ¿cuál habría sido el resultado si este diente estuviera todavía en la boca de Jonas?

— Hoy, nada. Ni mañana ni pasado. Quizá dentro de una semana algo de dolor en la muela.

Dentro de dos semanas el abismo: la necrosis del hueso mandibular y la lengua. Dentro de un

par de meses, la muerte, luego la mitad del rostro pudriéndose en carne viva.

[...]

El cónsul Viborg se secó el sudor frío de la frente con la servilleta manchada de sangre y miró fijamente al centro de mesa, donde estaba el diente, como si hubiera sido la cabeza de Medusa.

— Pero, ¿qué será de mí? Ya he llevado esta tela maldita conmigo durante dos o tres horas como mínimo.

— Y en su momento pagarás por ello, Jonas. No tengas dudas. Henri Becquerel había llevado su tubo de radio en el bolsillo izquierdo durante el mismo período de tiempo. El resultado, después de dos semanas, fue una bella quemadura en el estómago. Fue así que se descubrió el efecto fisiológico del radio.

— ¡Lindos descubrimientos. Se debería ahorcar a esa gente!⁽²⁾

Y así dejamos al irritado cónsul Viborg, después de haber tomado nota de que Irma falleció cuando su barco se hundió y de que el cónsul Viborg, “el jovial deportista, debe sufrir durante mucho tiempo las quemaduras producidas en tan corto lapso en su lengua y su encía, expuestas a la mortal radiación del empaste de radio”.

También podemos constatar que el barón Klinckowström debe haber tenido buenos asesores antes de describir las posibles consecuencias de la radiación del radio, correctamente narradas. Quizá haya recibido asesoramiento del “padre de la radiología sueca”, el profesor Gösta Forssell, ya que el barón Klewenhüller menciona en su libro a Forssell como uno de los tres suecos cuya habilidad científica puede medirse con la de Irma Brand (los otros dos, consideraba el barón, eran Svante Arrhenius y The Svedberg).

(2) Los datos técnicos exigen hacer algunos cálculos. El radio le debe haber costado a Irma 500 coronas por miligramo. Si el empaste, tal como el barón Klewenhüller sospecha, contiene radio por un valor de diez o quince mil coronas, estamos hablando de 20 a 30 miligramos. El cónsul había llevado consigo el radio durante aproximadamente 3 horas. La dosis de radiación, gracias a la extracción recomendada, debería haber sido uniforme y suficiente como para lesionar la encía y la lengua en las partes cercanas al diente. Después de algunos días la irradiación habría provocado serias lesiones. La cantidad de radio había sido bien elegida, tanto por la señorita Brand como por el autor.

Sin embargo, la información sobre el contenido de radio era errónea. Un gramo de radio genera una potencia de 0,1 watt. El empaste radiactivo debería haber generado de 2 a 3 milivatios. Un milivatio es aproximadamente 1/735 000 caballos, por lo que la potencia asociada al empaste debería haber sido la 4 millonésima parte de un caballo. La vida media nominal del radio es de aprox. 2300 años. La energía generada debería haber alcanzado para conducir durante 2300 años un automóvil con una potencia de 4 millonésimas partes de caballo (¡una idea curiosa y extravagante!) y para un automóvil con una potencia de 50 caballos hubiese alcanzado para una 4/50 millonésima parte de ese tiempo, es decir, aproximadamente una hora y media.

17 | La nueva física teórica

En el próximo capítulo se describen los hechos que permitieron conocer la estructura y propiedades del átomo, propiedades que son decisivas para su capacidad de emitir y absorber energía radiante. Pero primero conozcamos a algunas personas y hechos que van a constituir el marco de referencia para describir las observaciones físicas de difícil explicación, gracias a la construcción de herramientas teórico-matemáticas necesarias. Ya conocemos desde principios del siglo XX a tres gigantes de la física: Rutherford, Einstein y Bohr. Es interesante situarlos cronológicamente en contexto:

Rutherford:	1871 - 1937
Einstein:	1879 - 1955
Bohr:	1885 - 1962

A modo de comparación vamos a situar históricamente a los físicos que aparecen en este capítulo. Todos, excepto Wien, sobrevivieron a la II Guerra Mundial.

Planck	1858 - 1947
Lenard	1862 - 1947
Wien	1864 - 1928
Sommerfeld	1868 - 1951
Stark	1874 - 1957
Meitner	1878 - 1968
von Laue:	1879 - 1960
Born	1882 - 1970
Schrödinger	1887 - 1961
de Broglie	1892 - 1987
Szilard	1898 - 1964
Pauli	1900 - 1958
Fermi	1901 - 1954
Heisenberg	1901 - 1976
Wigner	1902 - 1995
Frisch	1904 - 1979
Segré	1905 - 1989
Oppenheimer	1905 - 1967
Teller	1908 -
von Weizsäcker	1912 -

El relato sobre esas personas está vinculado a una investigación sumamente teórica que exige importantes conocimientos matemáticos para poder comprenderla. “Explicar” esta investigación está fuera del alcance de este libro y más allá de los límites de mi propio conocimiento. Lo que puedo hacer es dar una idea de la misma e indicar los métodos que se utilizaron.

En 1913 Niels Bohr, que entonces tenía 28 años, había escrito su tesis sobre la estructura del átomo, en la que supuso que los electrones situados alrededor del núcleo solo pueden absorber niveles discretos de energía con diferencias que deben ser proporcionales a $h/2\pi$, en donde h es la constante de Planck.

Bohr regresó a Copenhague desde Manchester pero había intercambiado correspondencia con Rutherford y le había enviado su tesis para conocer sus puntos de vista. Quería que

lo ayudara con la publicación del trabajo. Rutherford escribió que la tesis era mejor que sus versiones anteriores, pero todavía demasiado extensa. ¿Podía aceptar Bohr que Rutherford la abreviara? Bohr se asustó, viajó a Manchester y logró gracias a sus argumentos que Rutherford aceptara la tesis en toda su extensión. El trabajo fue publicado en *Philosophical Magazine*.

La tesis de Bohr recibió diferentes comentarios. El viejo lord Rayleigh consideró que era de poco interés y Max von Laue pensaba que la teoría de Bohr era tan absurda, que abandonaría la física si Bohr tenía razón. Sin embargo, *Arnold Sommerfeld* (1868—1951), de Munich, estaba impresionado y afirmó que la tesis de Bohr constituía un hito en la física teórica. La teoría de Bohr estaba basada más en la intuición que en la teoría. El salto de energía entre las órbitas del electrón en el modelo atómico de Bohr era cuántico, pero todavía no existía la física cuántica.

Bohr viajó a Alemania al año siguiente, en 1914, para hablar con físicos de Göttingen y Munich y también para realizar excursiones a pie con su hermano. La guerra acortó el viaje y Bohr regresó a Dinamarca y más tarde a Manchester, para ayudar a Rutherford. Volvió a Copenhague en 1916 y pensó que la física resultaba ahora tan complicada que era necesaria la cooperación internacional. Soñaba con tener su propio instituto de investigación, abierto a todos los investigadores del mundo. En 1920 el sueño se convirtió en realidad al convertirse Bohr en director del nuevo instituto de física teórica de la universidad de Copenhague, un instituto que jugaría un gran papel en la colaboración internacional de la física. En 1922 obtuvo el premio Nobel de física por su modelo atómico, adquiriendo notoriedad en todo el mundo.

La guerra había impedido que muchos investigadores se dedicaran a la nueva física y los signos de interrogación que planteaba el modelo atómico de Bohr no estaban resueltos. Antes de la guerra, en 1913, Einstein había sido director del Instituto de física Kaiser-Wilhelm, pero su éxito irritó a otros físicos alemanes, principalmente a Philipp Lenard. El joven *Werner Heisenberg* (1901—1976), que estudiaba física con Sommerfeld en Munich junto con *Wolfgang Pauli* (1900—1958) y que defendería su tesis en 1923, llegó en 1922 a Leipzig junto con Sommerfeld para asistir a una conferencia del famoso Einstein. Pero la conferencia se canceló debido a las manifestaciones contra Einstein, ya que algunos estudiantes repartieron folletos que atacaban la “física judía” de Einstein. Heisenberg relató la situación al ingresar en la sala de conferencias:

Un joven me entregó un folleto rojo donde se decía, palabra más, palabra menos, que la teoría de la relatividad era una especulación judía que no había sido comprobada y que había sido dada a conocer mediante publicaciones exageradas en los diarios judíos que estaban a favor de su compañero de raza, Einstein. Primero pensé que esto era obra de algunos locos que visitan cada tanto estas conferencias. Pero mis esperanzas desaparecieron cuando noté que ese folleto rojo era divulgado por los físicos experimentales alemanes más respetados [Philipp Lenard], obviamente con su beneplácito. La ciencia también había sido envenenada por las pasiones políticas.

Heisenberg acompañó a Sommerfeld ese mismo año hasta Göttingen para escuchar una conferencia de Niels Bohr. En el debate, Heisenberg criticó una de las afirmaciones de Bohr, algo que éste apreció tanto, que fue suficiente para invitar al joven físico a dar un paseo por las montañas y así conocerlo mejor.

En 1923 Heisenberg leyó su tesis ante Sommerfeld en Munich y se mudó luego a Göttingen como docente de *Max Born* (1882—1970), que entonces era profesor de física teórica. Así comenzó una cooperación que les valdría un premio Nobel.

Göttingen era el centro de investigación más importante del mundo de la física teórica y la matemática en la década de 1920, junto con el instituto de Bohr. Allí estaban los famosos

matemáticos *David Hilbert* (1862—1943) y *Richard Courant* (1888—1972), y durante algunos períodos estuvieron también muchos de los jóvenes físicos europeos: *Wolfgang Pauli*, *Eugene Wigner* (1902—1995), *Robert Oppenheimer* (1905—1967) y *Enrico Fermi* (1901—1954).

Heisenberg recibió una invitación para visitar a Bohr en Copenhague en 1924. Bohr estaba entusiasmado con el joven físico alemán en Göttingen y trataba de ayudarlo provocándolo con intensas discusiones científicas mientras realizaban largos paseos. Así se establecían las bases de una amistad que duraría muchos años, en una relación donde Bohr asumiría el papel de un padre. Bohr tenía 16 años más que Heisenberg. Al mismo tiempo se sembraba la semilla de la discordia al discutir juntos sobre la situación en Alemania sobre la I Guerra Mundial.

Bohr desconfiaba y veía con desgano al nacionalismo alemán. Durante la siguiente guerra mundial, Bohr tendría una actitud nacionalista en Dinamarca, definida por él como “amor a la patria”, mientras que consideraba al nacionalismo alemán como “agresividad germana”. No comprendía la “fiebre de guerra” que afectaba a todos los alemanes. Esa fiebre era para él irracional y estaba teñida de barbarie.

Heisenberg trató de defenderse: tenía solo 12 años cuando comenzó la I Guerra Mundial. Éste amaba a su país. Los alemanes, al igual que el primo de Heisenberg (muerto al inicio de la guerra), lo consideraban como algo determinado por el destino. ¿Qué elección tenían? Pero Bohr tenía una actitud poco comprensiva al respecto y consideraba que esa era una conducta primitiva. “Lo que cuentas me aflige mucho”, afirmó.

En 1924 el físico francés duque *Louis de Broglie* (1892—1987) presentó su tesis doctoral acerca de las ondas de materia. Einstein había señalado anteriormente que las ondas de luz también podían ser entendidas como paquetes de ondas con propiedades de partícula, los fotones. De Broglie supuso que también se podía aplicar el caso inverso, de modo tal que las partículas pudieran ser descriptas con la ayuda de una analogía de onda. La longitud de onda (λ) en cuestión era igual a la constante de Planck (h) dividida por *la cantidad de movimiento o impulso* de la partícula¹ (la cantidad de movimiento de la partícula es el producto de su masa y velocidad):

$$\lambda = h / (m.v) \quad (17.1)$$

Bohr y Heisenberg habían tenido profundas discusiones acerca del hecho de que las órbitas de electrones del átomo solo podían equivaler a ciertos estados energéticos determinados, de tal modo que los niveles de energía estén *cuantificados*. ¿Se podía encontrar algún buen modelo físico para describirlo? La teoría llegó de la mano de Heisenberg. Necesitaba respirar aire libre de polen y por ello se dirigió a Helgoland en busca del aire de mar en mayo de 1925. El cambio de entorno le permitió ver los problemas desde nuevos ángulos de incidencia y de repente vio un método para manejarlos, un método con consecuencia matemática y lógica. Heisenberg se sintió eufórico y preocupado a la vez, y escribiría luego (según Richard Rhodes):

Primero estaba profundamente preocupado. Tenía la sensación de que a través de la cáscara del fenómeno atómico podía ver un interior bello rara vez visto y me sentía casi mareado al pensar que debía introducirme en su reino de estructuras matemáticas que la naturaleza tan generosamente había diseminado ante mí. Estaba demasiado excitado como para dormir y por ello debía marcharme cuando amaneciera hacia el cabo sur de la isla, donde yo deseaba escalar un peñón que se introducía en el mar. Lo hice sin demasiada dificultad y esperé la salida del sol.

^{<?>} Nota del Revisor: La variación de la cantidad de movimiento de una partícula durante un intervalo de tiempo es igual al impulso de la fuerza (integral de la fuerza en ese intervalo de tiempo) resultante que actúa sobre la partícula durante ese intervalo.

Lo que se le ocurrió a Heisenberg era describir el estado del átomo mediante magnitudes observables que se podían procesar con la ayuda de una *matriz de cálculo*, tales como la frecuencia de la radiación emitida, la intensidad y la polarización. Una matriz es una disposición de magnitudes en un orden dado. Un ejemplo sencillo es el resultado (triunfo o derrota) cuando, por ejemplo, cuatro personas juegan al tenis:

	Elsa	Maria	Karin	Eva
Elsa	o	triunfo	derrota	triunfo
Maria	derrota	o	triunfo	derrota
Karin	triunfo	derrota	o	derrota
Eva	derrota	triunfo	triunfo	o

Esto puede escribirse en forma de matriz, en el que el elemento a_{ij} se encuentra en la fila i , y en la columna j correspondiente. En la matriz que equivale al resultado de tenis de arriba es, por lo tanto a_{32} = “derrota” ya que Karin perdió contra María. El ejemplo da por lo tanto la matriz:

$$\begin{matrix}
 a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\
 a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\
 a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\
 a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44}
 \end{matrix} \quad (17.2)$$

En el ejemplo sencillo del tenis es $a_{11} = a_{22} = a_{33} = a_{44} = \text{“o”}$, ya que nadie se enfrenta a sí mismo. Si todos los elementos que están colocados simétricamente en relación con la diagonal principal (es decir, los ceros, en el ejemplo de arriba) son iguales, por ej., $a_{13} = a_{31}$, la matriz cuadrada se denomina *simétrica*. Si los elementos simétricos son diferentes pero de alguna manera afines, por ejemplo, son el opuesto del otro, las denominamos *conjugadas*.

En mi ejemplo los elementos simétricos son conjugados, ya que el triunfo de un jugador implica automáticamente la derrota del otro. Se suele representar a un elemento conjugado con un asterisco, por ejemplo, $a_{31} = a_{13}^*$. Un caso especial son las cantidades *conjugadas complejas*, por ejemplo,

$$\begin{aligned}
 a_{13} &= a - i b \\
 a_{31} &= a + i b = a_{13}^*
 \end{aligned} \quad (17.3)$$

en la que “ i ” es el símbolo de la raíz cuadrada de -1 , es decir, un número tal que multiplicado por sí mismo sea -1 .

Las matrices cuadradas con elementos que son cantidades complejas conjugadas se denominan *matrices hermitianas* ⁽²⁾. El nombre viene del matemático francés *Charles Hermite* (1822–1901). Heisenberg realizó disposiciones de las diferentes energías ($E^{(1)}$, $E^{(2)}$, $E^{(3)}$... etc.) de transición tal como ocurre con los electrones en el modelo atómico de Bohr, asociándolas con osciladores armónicos simples. De acuerdo con la hipótesis de cuantificación esas energías están limitadas a tomar valores discretos así como las frecuencias básicas correspondientes (“los tonos básicos”) $\nu^{(1)}$, $\nu^{(2)}$, $\nu^{(3)}$... etc. de cada oscilación. Si la oscilación no es armónica, es decir, si comprende más frecuencias que el tono básico, se puede considerar compuesta por oscilaciones armónicas con “sobretonos” 2ν , 3ν , 4ν ... etc.

(2) Nota del Revisor: Matriz hermitiana es la traspuesta conjugada de una matriz cuyos elementos son números complejos, es decir, es una matriz cuadrada en la que el elemento en la i -ésima fila y j -ésima columna es igual al conjugado del elemento en la j -ésima fila e i -ésima columna, para todos los índices i y j .

Cada oscilación armónica tiene una *amplitud* (desviación de la media aritmética) que puede describirse con una función seno, de tal modo que la amplitud sea proporcional al seno ($2\pi\nu t$) en donde t representa al tiempo. Todo ingeniero sabe que el seno de un ángulo x también se puede escribir con la ayuda de términos exponenciales:

$$\text{sen } x = \frac{1}{2i} (e^{ix} - e^{-ix}) \quad (17.4)$$

Si “ k ” representa al sobretono n y q_k a un coeficiente equivalente, la amplitud total de la oscilación puede escribirse como

$$q(t) = q_0 + q_1 e^{2\pi i \nu t} + q_2 e^{2\pi i (2\nu)t} + q_3 e^{2\pi i (3\nu)t} + \dots + q_k e^{2\pi i (k\nu)t} + \dots + q_{-1} e^{-2\pi i \nu t} + q_{-2} e^{-2\pi i (2\nu)t} + q_{-3} e^{-2\pi i (3\nu)t} + \dots + q_{-k} e^{-2\pi i (k\nu)t} + \dots \quad (17.5)$$

En esta expresión aparecen términos con los coeficientes q_k y q_{-k} de dos en dos. Esos términos son complejos conjugados, es decir $q_k = q_{-k}^*$ o $q_k^* = q_{-k}$. El término constante q_0 indica la distancia de la partícula que vibra a un punto cero dado.

Puesto que esta expresión puede aplicarse a cada una de las frecuencias básicas $\nu^{(n)}$ asociadas a las energías permitidas E_n ($n = 1, 2, 3 \dots$), todos los términos pueden distribuirse para que juntos constituyan una matriz, lo cual posibilita nuevos cálculos⁽³⁾.

Cuando Heisenberg volvió a ver a Max Born en Göttingen, éste reconoció la formulación matemática de Heisenberg. Heisenberg había utilizado las reglas existentes para los cálculos con ayuda de las matrices. Él había formalizado la *mecánica cuántica*.

Göttingen era el lugar correcto para la aplicación de la matriz de cálculo. El profesor de matemática de Born, David Hilbert, era todavía profesor y había desarrollado métodos para los cálculos de la matriz.⁽⁴⁾ En Göttingen estaba también el joven Wolfgang Pauli, que a los 21 años había escrito una monografía imponente sobre la teoría de la relatividad y todos, inclusive él mismo, lo consideraban un genio. Pauli fue nombrado profesor en Hamburgo en 1926 y luego en Zurich en 1928. Tenía el hábito de decir siempre lo que pensaba sin cumplidos innecesarios, pero lo alentaba a Heisenberg. Mientras éste estaba de visita en el laboratorio de Cavendish, Max Born le preguntó a Pauli si él no quería ayudarlo a mejorar la matemática de Heisenberg. Pauli declinó la invitación, afirmando que se arriesgaba a arruinar las ideas de Heisenberg con un “formalismo aburrido y complicado”.

Sin embargo Born consideraba importante la formalización, y durante algunos meses trabajó junto con Heisenberg y otro físico joven, *Pascual Jordan* (1902–1980), para desarrollar la *mecánica matricial* como el primer modelo de mecánica cuántica. El resultado fue publicado en noviembre de 1925.

Heisenberg estaba nervioso e inseguro de sí mismo, pero Pauli quedó impresionado y aplicó el método sobre el átomo de hidrógeno y logró deducir tanto la fórmula de Balmer como la constante de Rydberg, sin necesitar repetir las hipótesis arbitrarias anteriores de Bohr. Pauli formuló también en 1925 lo que suele llamarse *el principio de Pauli*. Él extrajo la conclusión de

3 Nota del Revisor: Esta representación de Heisenberg en la cual los elementos A_{mn} de la matriz del operador A son dependientes del tiempo y la función de onda es independiente del tiempo, es una de las formulaciones posibles de la dinámica cuántica (la representación de Schrödinger es otra posible). Ello es así porque las entidades matemáticas tales como los operadores y las funciones de onda no son directamente accesibles a las mediciones físicas, sino que la comprobación con la observación se realiza en términos de los valores propios del operador A de que se trata y de los coeficientes de expansión de las funciones de onda en un espacio de funciones propias ortonormales (ver ecuación 17.8)

4 El libro *Methoden der mathematischen Physik* (1904) de Hilbert y Richard Courant es considerado de gran importancia para el desarrollo de la mecánica cuántica, ya que trata muchos de los problemas matemáticos actuales.

que está “prohibido” que dos electrones tengan el mismo valor de todos los números cuánticos (ver el final del cap. 9)⁽⁵⁾. El Principio de Pauli fue de enorme importancia para la interpretación del sistema periódico de los elementos, ya que determina la cantidad de electrones posibles en cada nivel de energía. Si los niveles de energía están “llenos”, disminuye la posibilidad de reacciones químicas (como en los gases nobles).

Bohr estaba encantado con los avances de Heisenberg y le escribió a Rutherford:

Heisenberg es un joven alemán, dotado y exitoso. Con su último trabajo se han cumplido todas las expectativas, que habiendo sido vagas, han sido durante mucho tiempo el centro de nuestros deseos. Ahora vemos la posibilidad de elaborar una teoría cuantitativa de la estructura del átomo.

Pero en 1926 hizo su entrada en escena una teoría que competiría con esa, introducida por un físico algo mayor, *Erwin Schrödinger* (1887—1961), tan solo dos años más joven que Bohr. Schrödinger era entonces profesor de física en la escuela superior técnica en Zurich. Había leído una tesis de Einstein acerca de la teoría del duque de Broglie sobre las ondas de materia. Si esto significaba que los electrones también tenían propiedades ondulatorias, la condición para una onda estacionaria alrededor del núcleo del átomo a una distancia r del centro sería que “las posiciones orbitales” $2 \pi r$ deben ser un número entero (n) de longitudes de onda, es decir

$$2 \pi r = n \lambda = nh / (mv) \quad (17.6)$$

Esta expresión es idéntica a las condiciones de Bohr para las órbitas del electrón (9.12). Las ondas de materia con otras longitudes de onda desaparecerían mediante la interferencia. La mística cuantificación de los niveles de energía podría explicarse con ayuda del concepto de onda de la física clásica.

Schrödinger siguió construyendo su idea y examinó cómo se podría aplicar la *ecuación de longitud de onda*. La ecuación de longitud de onda es una ecuación diferencial parcial, lo cual implica que contiene *derivadas parciales*, es decir, derivadas respecto de una de las variables de la función derivada, mientras las otras son consideradas como constantes. La ecuación de longitud de onda describe generalmente la propagación de las ondas. Mientras que las derivadas comunes, por ejemplo, de la función $F(x)$, se representan dF/dx , las derivadas parciales se escriben respecto de “ x ”, “ y ” y “ z ” de una función $F(x,y,z)$ como $\partial F / \partial x$, $\partial F / \partial y$ y $\partial F / \partial z$. De manera equivalente se escriben las derivadas segundas ⁽²⁾ $\partial^2 F / \partial x^2$ etc.

Schrödinger introdujo una función $\Psi(x,y,z,t)$, que denominó *función de onda*, y que puede verse como compuesta por una función espacial $\psi(x,y,z)$ y una función temporal $f(t)$. Esta última se puede indicar de igual manera que para las funciones periódicas (ver la discusión sobre el mecanismo de la matriz) como una función de variable compleja. Schrödinger presentó condiciones que se describen en la famosa *Ecuación de Schrödinger* para la función espacial:

$$\partial^2 \psi / \partial x^2 + \partial^2 \psi / \partial y^2 + \partial^2 \psi / \partial z^2 + \frac{8\pi^2 m}{h^2} (E - U) m \psi = 0 \quad (17.7)$$

(5) Nota del Revisor: El Principio de Exclusión de Pauli expresa que el estado de ningún par de electrones tiene un estado que pueda ser descrito por funciones de onda caracterizadas por el mismo conjunto de números cuánticos.

En esa expresión, “m” es la masa del electrón, E es su energía total y U, su energía potencial. Se suele introducir un *operador* que se representa con Δ que, si se aplica a una función, significa la suma de las derivadas segundas parciales con relación a “x”, “y” y “z”. Con la ayuda de este operador, la ecuación de Schrödinger se puede escribir de manera más sencilla

$$\Delta\psi + \frac{8\pi^2 m}{h^2}(E - U)\psi = 0 \quad (17.8)$$

La ecuación de Schrödinger solo se puede solucionar para ciertos valores de E, los cuales son denominados *valores propios*. Se ha puesto de manifiesto que esos valores propios son idénticos a los niveles de energía que Bohr calculó para su modelo atómico (ecuación 9.13). A los valores propios corresponden las *funciones propias* del problema, las cuales están constituidas por las funciones $\psi(x,y,z)$ que constituyen las soluciones de la ecuación de Schrödinger. Esas funciones tienen, por lo tanto, valores dados en el espacio. Se puede ilustrar mejor cómo esos valores se distribuyen geoméricamente mediante una división de la función de onda en dos componentes, una $f(r)$, que indica cómo los valores varían con la distancia r del centro, y una $g(\varphi, \vartheta)$, que indica la dirección de los valores como función de los ángulos φ y ϑ .

Resulta ser que la función $f(r)$ está determinada por dos parámetros que son idénticos al *número cuántico principal* n y al *número cuántico secundario* l, tal como aparecen en la descripción del modelo atómico que menciono al final del capítulo 9. El número cuántico principal indica los diferentes niveles de energía como “cáscara” a diferentes distancias del núcleo del átomo y el número cuántico secundario puede interpretarse como una medida del *momento cinético* (= *impulso angular*). En la parte direccional de la función de onda no está incluido el número principal cuántico n como un parámetro, en cambio sí lo está el número cuántico secundario l y el *número cuántico magnético* m, mencionado en el capítulo 9.

La cuantificación de los niveles de energía (E_n) que Bohr introdujo intuitivamente para explicar las propiedades del átomo y que constituyen una base de la mecánica cuántica, no es una base sino más bien un resultado del modelo *mecánico-ondulatorio* de Schrödinger y su formulación matemática. La teoría de Schrödinger resultó atractiva para los físicos que tenían dificultad de “comprender” la mecánica cuántica y las hipótesis de Bohr. Ni siquiera Max Planck había visto algún “significado” físico en su constante h, sino que dijo que la había introducido solo para conseguir que las fórmulas que describían la emisión de la radiación coincidieran con lo que se había observado experimentalmente.

Heisenberg vio la mecánica ondulatoria de Schrödinger como un ataque contra su mecánica cuántica. En una conferencia de Schrödinger en Munich en 1926, éste fue criticado por Heisenberg, quien afirmó que Schrödinger tiraba abajo lo que se había construido con tanto esfuerzo y que la mecánica ondulatoria de Schrödinger no podía explicar la ley de radiación de Planck. El profesor sueco de física *Gudmund Borelius* (1889–1985), mi viejo maestro en el Escuela Superior Técnica KTH, estuvo presente en la conferencia de Schrödinger durante una visita a Sommerfeld, quien le había contado a Borelius acerca de la joven promesa que significaba Heisenberg. Sommerfeld tuvo la impresión de que Heisenberg y Schrödinger hablaban sobre la misma cuestión pero utilizaban instrumentos matemáticos diferentes. Heisenberg lo negó y la discusión duró una hora. Cuando salimos para tomar una cerveza, recordaba Borelius, había nacido la mecánica cuántica.

Heisenberg no recibió mucho apoyo, ni siquiera de Sommerfeld, quien estaba impresionado por la matemática de Schrödinger. Otros físicos le tiraron una indirecta a Bohr y Heisenberg por el misticismo y afirmaron que era hora de dejar las herejías que habían crecido

a través de las hipótesis de Planck acerca de la radiación. Uno de ellos era el respetado físico clásico Wilhelm Wien, profesor de física en Munich. Solo Bohr defendió a Heisenberg. Lo hizo invitando a Schrödinger a Copenhague en septiembre de 1926. Heisenberg, que también estaba presente, describió todo el ardiente debate que ya había comenzado cuando Bohr se reunió con Schrödinger en el Hovedbanegaarden y que continuó más o menos durante todo el día (según Rhodes):

Pues a pesar de que Bohr también era una persona muy considerada y servicial, también participó en esa discusión relacionada con preguntas epistemológicas que consideraba sumamente importantes, y era capaz de hacer gala de una crueldad fanática, casi intimidatoria, para exigir aclaraciones completas de todas las argumentaciones. No se rendía, ni siquiera después de horas de pelea, hasta que Schrödinger reconoció que su interpretación era insuficiente y ni siquiera podía explicar la ley de Planck. Cada intento de parte de Schrödinger de evitar esta amarga verdad era rebatida punto por punto en discusiones interminables y meticulosas.

No se pudo escapar de Bohr ni siquiera cuando se resfrió y debió guardar cama, ya que lamentablemente vivía en su casa. La señora Bohr lo cuidaba mientras Bohr estaba sentado en el borde de la cama y repetía: “Schrödinger, usted debe comprender...” o “Pero, Schrödinger, tiene que reconocer que...” Finalmente Schrödinger dejó Copenhague, cansado y abatido, después de que Bohr lo despidiera con estas palabras: “Pero todos nosotros le estamos agradecidos por lo que ha hecho. Ha llevado a la física a dar un paso decisivo hacia adelante.”

El contraste entre la mecánica ondulatoria y la cuántica no constituyó un problema para Bohr y Heisenberg, que pasaron un buen tiempo juntos en Copenhague. Schrödinger vio la teoría ondulatoria como una descripción de la realidad. Heisenberg veía la formulación matemática de la mecánica cuántica como un modelo abstracto. Bohr elucubraba sobre cómo se podían unir dos conceptos tan diferentes tales como partículas y ondulaciones.

Un atisbo de solución llegó gracias a la interpretación que hizo Max Born de la función ondulatoria de Schrödinger ψ . Esta no tiene ningún significado físico pero su cuadrado⁽⁶⁾, o más bien el producto de ψ y su función compleja conjugada ψ^* — puede, después de una adecuada estandarización, ser interpretada como la probabilidad por unidad de volumen (*densidad de probabilidad*) de que un electrón se encuentre en un lugar determinado. Con esta interpretación de la probabilidad de la función ondulatoria, que le valdría a Born un premio Nobel, la mecánica cuántica de Heisenberg y la mecánica ondulatoria de Schrödinger pudieron ser vistas como diferentes métodos matemáticos para describir el mismo fenómeno. Y a mayor abundamiento, Schrödinger logró deducir la ley de radiación de Planck.

En febrero de 1927 Heisenberg tuvo la idea que luego se asociaría a su nombre. Él contó que esa idea creció durante un paseo que realizó a la medianoche en un parque situado junto a las canchas de fútbol que estaban detrás del instituto de Bohr. Allí fue donde formuló lo que sería *el principio de inseguridad o de incertidumbre de Heisenberg*. El nombre desorientaba un poco, ya que el principio no hacía referencia a ninguna inseguridad sino más bien a una indeterminación. Según este principio no es posible determinar con gran exactitud dos magnitudes cuyo producto tenga la dimensión energía tiempo⁽⁷⁾. Naturalmente que esto tiene validez para las magnitudes energía y tiempo, pero también para la posición

(6) Nota del Revisor: Debe tomarse el cuadrado del valor absoluto de ψ .

(7) Nota del Revisor: Debe entenderse que la determinación de ambas variables es simultánea

y el impulso (ver Nota del Revisor [1]). Esas magnitudes se denominan *variables canónicas conjugadas*. El principio de incertidumbre suele escribirse:

$$\Delta x \times \Delta p \geq h/2\pi \quad (17.9)$$

Aquí se representa la constante de Planck con “h” pero Δ ya no es el operador que se utilizó en la expresión para la ecuación de Schrödinger; “ Δx ” y “ Δp ” representan en su lugar la incertidumbre de la posición de una partícula según la coordenada x respecto de la incertidumbre de la componente del impulso $p = mv_x$ en la misma dirección. Como ejemplo, Δx es muy grande para un electrón alrededor de un núcleo atómico, ya que no podemos decir exactamente dónde se encuentra el electrón, sino que debemos utilizar una medida de probabilidad. Significa, sin embargo, que el impulso del electrón puede determinarse con gran exactitud. Si se ven las partículas como un paquete de ondas de materia con longitud de onda “ $\lambda = h/(mv) = h/p$ ” y puede determinarse el impulso “ p ”, y con ello la longitud de onda λ con gran exactitud, se está ante una onda senoidal simple y con ello un paquete de onda con extensión ilimitada, es decir, con gran inseguridad acerca de la posición de la partícula. Si se puede determinar bien la posición, es decir, un paquete de onda muy corto, esto solo es posible a través de la interferencia entre muchas ondas con diferente longitud de onda, lo cual hace al impulso indeterminado.

Heisenberg le escribió a Pauli acerca de su relación de incertidumbre y recibió una respuesta positiva: “Es el amanecer de la teoría cuántica.” Bohr no era tan positivo, y eso dio comienzo a intensas discusiones, ahora entre Bohr y Heisenberg. Bohr había estado de vacaciones estudiando en Noruega y había encontrado un principio propio que ahora cuidaba. Lo denominó “Principio de complementariedad”. Bohr quería que la mecánica cuántica se basara en el dualismo onda-partícula. En pocas palabras, el principio significa que no se pueden determinar todas las magnitudes mensurables físicamente en un sistema cuántico. La medición de una de las dos magnitudes canónicas influye de una manera incierta sobre la otra. En la física clásica las mediciones influyen también sobre el sistema observado, pero de una manera que se puede calcular. En la física cuántica se pierde la relación causa-efecto a nivel atómico. Todo lo que resta son probabilidades. Y la realidad que está detrás de nuestras observaciones no está “compuesta” ni por partículas ni por ondas. Son los modelos a los que nosotros mismos recurrimos para describir la realidad.

En septiembre de 1927 se celebró en Italia el centenario del fallecimiento de Alessandro Volta con un gran congreso de física en la ciudad de Como. Participó la mayoría de los físicos importantes ya que la física cuántica era motivo de debate. Pero faltaron algunos, entre ellos Albert Einstein, que no quería aparecer apoyando al gobierno fascista italiano encabezado por Benito Mussolini. A poco del inicio del congreso y tras un prolongado intercambio de opiniones en el que Heisenberg tuvo ataques de llanto, éste y Bohr llegaron a un acuerdo sobre el principio de incertidumbre, estableciendo que era un caso especial del principio de complementariedad de Bohr.

En la ciudad de Como, *Emilio Segrè* (1905–1989), un joven estudiante, escuchó la conferencia de Bohr y resumió mucho más tarde la manera de explicar el término complementariedad:

Dos magnitudes son complementarias si la medición de una impide la medición simultánea exacta de la otra. De la misma manera dos términos son complementarios si uno de ellos implica limitaciones del otro.

Después del congreso en Como se realizó la Conferencia anual Solvay en Bruselas⁽⁸⁾, y en esa Einstein sí pudo participar. A Einstein no le gustaba la mecánica cuántica, tal como la habían presentado Bohr y Heisenberg. Lo que atormentaba a Einstein era el rechazo al determinismo. Él consideraba que todo estaba establecido, incluso a nivel atómico, y si solo se supiese cómo, se podría predecir exactamente lo que sucedería. “Dios no juega a los dados” era la objeción de Einstein.

Las discusiones entre Bohr y Einstein en Bruselas en 1927 son históricas. No solo tenían lugar durante la conferencia sino que eran ininterrumpidas: comenzaban en el desayuno y finalizaban bien entrada la noche. Einstein tenía 48 años y Bohr 42. Heisenberg, que apoyaba a Bohr, solo 26. Cada mañana Einstein tenía nuevos argumentos; cada noche Bohr los refutaba. Ambos eran increíblemente obstinados y las discusiones continuaron hasta el comienzo de la guerra en 1939. Bohr consideraba que Einstein estaba demasiado aferrado a las viejas ideas acerca de la causalidad y carecía de imaginación. Cuando Einstein repitió su objeción diciendo que Dios no juega a los dados y que era absurdo suponer que los acontecimientos tenían lugar de manera fortuita, Bohr respondió irritado que “no es asunto nuestro decretar cómo Dios debe cuidar al mundo”.

En la década de 1930 comenzaron las persecuciones con apoyo gubernamental contra los judíos en Alemania. Incluso antes de la ascensión de Hitler se habían convertido en algo común. En 1931 *Hans Bethe* (1906-), que entonces tenía 25 años, fue testigo de insultos contra los judíos en un seminario en la casa de Sommerfeld. Cuando éste levantó el pizarrón exterior, se pudo leer lo que estaba escrito con letras mayúsculas en el pizarrón oculto: “MALDITOS JUDÍOS”.

De los judíos europeos que luego tendrían un papel significativo en la investigación futura había varios provenientes de Hungría: Georg de Hevesy, Leo Szilard, Eugene Wigner, *John von Neumann* (1903–1957) y Edward Teller. De todos ellos, de Hevesy dejó Hungría en 1904 para trabajar con Fritz Haber en Berlín y luego con Rutherford. Regresó a Budapest para hacerse cargo de una cátedra en 1918, pero abandonó Hungría nuevamente en 1919.

Hungría no era un lugar agradable para los intelectuales judíos de familias adineradas después de la I Guerra Mundial. Los cinco investigadores citados pertenecían a ese grupo. La república húngara fue proclamada el 16 de noviembre de 1918 luego de la caída de la doble monarquía, pero el 21 de marzo de 1919 se transformó en república soviética, comenzando así 133 días del régimen de terror de *Béla Kun* (1886–1939). El terror rojo fue seguido del terror blanco del almirante ultraconservador *Miklós Horthy* (1868–1957) hasta 1944. En 1920 Horthy introdujo la primera ley rascista, que limitaba la posibilidad de estudiar a los judíos. La persecución racial creció drásticamente con la constitución del partido nazi, el así llamado *partido de la cruz flechada*, en 1940. Después de que Hitler depuso a Horthy en 1944, la persecución de los judíos llegó a su punto culminante. Y eso duró hasta 1945, año en que los alemanes fueron expulsados del país. Un conocido biólogo especializado en biología tumoral, *Georg Klein* (1925-), logró salvarse para luego establecerse en Suecia. Actualmente reside en Estocolmo.

Es fácil comprender porqué de Hevesy abandonó nuevamente Hungría en 1919 y porqué físicos como Szilard, Wigner y Teller fueron refugiados y observaban con gran preocupación la evolución paralela de los acontecimientos en Alemania. Es una ironía del destino que esos físicos fueran luego los impulsores del desarrollo de las armas atómicas estadounidenses destinadas a apuntar a Alemania, pero que finalmente fueron utilizadas en Japón.

(8) Las conferencias Solvay se organizaban cada 3 años en el Instituto Solvay de física y química de Bruselas. El instituto fue fundado en la década de 1890 por el industrial belga *Ernest Solvay* (1838-1922), conocido por ser el inventor del proceso Solvay para fabricación de soda.

El diplomático alemán *Ernst von Weizsäcker* (1882—1951) fue consejero de legación durante el período 1924— 1927 en Copenhague. Weizsäcker fue secretario de estado durante la II Guerra Mundial en el ministerio de relaciones exteriores alemán y fue hombre de confianza de von Ribbentrop. Era conservador, pero no le agradaba el nazismo y asumió grandes riesgos para impedir la guerra. Después de la contienda mantuvo relaciones estrechas con la resistencia alemana. A pesar de eso fue condenado a la cárcel por complicidad en el ataque contra Checoslovaquia, pero fue liberado 18 meses después.

Los hijos de Weizsäcker, Richard y Carl Friedrich, fueron famosos. *Richard von Weizsäcker* (1920-) fue presidente de Alemania Occidental y Carl Friedrich von Weizsäcker (1912-) se convertiría en físico nuclear y filósofo. Antes había sido colaborador de Lise Meitner y Heisenberg. Heisenberg y Carl Friedrich se conocieron en Copenhague en 1927, cuando Heisenberg visitó la casa de von Weizsäcker. Treinta años más tarde Carl Friedrich describiría ese encuentro (según Thomas Powers):

Un día mi madre me contó que había conocido a un científico alemán muy joven que trabajaba junto con el famoso físico danés Niels Bohr (cuyo nombre apenas conocía). El científico alemán había tocado muy bien el piano y era muy agradable. Le pregunté: “¿cómo se llama?” y me contestó: “Se llama Heisenberg”. Yo había visto su nombre en una de las publicaciones de la época que tenía cuando era niño en la que se contaba los avances de la ciencia, y dije: “Tengo que conocer a este hombre. Tienes que invitarlo a casa.” Ella lo invitó y así conocí a Werner Heisenberg cuando él tenía 25 años y yo 14. Tuvimos largas discusiones y yo estaba impresionado al ver a un hombre que sabía todo mejor que yo (pues yo estaba muy orgulloso de mis resultados). Él era mejor que yo en física y matemática, sin dudas, pero también hablaba mejor el danés, inglés e incluso sabía música (algo que yo no comprendía). También sabía esquiar (yo no tenía habilidad para ese deporte) y jugaba mejor al ajedrez, a pesar de que yo era un buen jugador.

Algunas semanas más tarde se encontraron casualmente en Berlín, justo cuando Heisenberg estaba eufórico después de haber finalizado su tesis sobre la relación de incertidumbre aunque ésta no había sido todavía publicada. Heisenberg dijo: “¡Creo que he refutado la ley sobre causa y efecto!” Carl Friedrich Von Weizsäcker decidió estudiar física para poder continuar conversando con Heisenberg. Así se establecieron las bases de una amistad que duraría toda la vida.

En 1932 Heisenberg se reunió con Bohr y le presentó a Carl Friedrich. El joven von Weizsäcker debió escuchar la compleja discusión entre Bohr y Heisenberg, en la que Bohr parecía esforzarse para explicar su parecer. Weizsäcker escribiría luego en su diario privado que por primera vez había visto a un físico: “Él sufre cuando piensa.”

El 30 de enero de 1933, asumió a los 43 años como canciller alemán Adolf Hitler y fue entonces cuando comenzaron realmente las persecuciones contra los judíos. Pauli, que estaba seguro en Zurich, había tranquilizado a quienes se preocupaban pensando que una dictadura era posible en Rusia pero jamás en Alemania. Pronto cambiaría de opinión. Las leyes antisemitas de abril de 1933 excluyeron a los judíos de las instituciones y universidades estatales. Una cuarta parte de los físicos de Alemania perdió su trabajo. Einstein, más previsor que la mayoría, ya había partido y los demás debieron seguir sus pasos. Entre los pocos que se quedaron estaba Lise Meitner. Era ciudadana austríaca y el instituto Kaiser-Wilhelm no era estatal, y por eso se sentía segura. Nunca se había considerado judía, tenía una formación protestante y había sido bautizada, pero pronto la obligaron a llevar la estrella de los judíos.

Niels Bohr viajó a Alemania para informarse por sí mismo acerca de la situación. En Hamburgo conoció al sobrino de Lise Meitner, *Otto Robert Frisch* (1904—1979), un joven físico experimental que había regresado tras un año en casa de Fermi, en Roma, pero que ahora no veía ninguna posibilidad de residir en Alemania. Frisch había verificado recientemente la tesis de la mecánica cuántica según la cual un átomo que emite un fotón debe exponerse a un efecto de retroceso, tal como un rifle cuando se dispara un tiro. Nadie pensaba que era posible demostrar el retroceso de un átomo, algo seguramente insignificante, pero el hábil Frisch lo logró. Frisch relató la visita de Bohr (según Rhodes):

Para mí fue un gran acontecimiento estar frente a Niels Bohr — un nombre legendario para mí — y verlo sonreír hacia mí como un padre. Me tomó del botón de mi chaleco y dijo “Espero que vengas a trabajar con nosotros alguna vez. ¡Nos gusta la gente que plantea hipótesis!” Esa noche le escribí a mi madre y le dije que no necesitaba preocuparse: El mismísimo Dios había tomado el botón de mi chaleco y me sonrió. Así me sentía yo.

Muchos de los físicos no judíos estaban conmovidos por lo que estaba sucediendo. Max Born había dejado Göttingen en silencio, pero el matemático Richard Courant se negó a partir. Junto con otros colegas escribió una nota de protesta que fue enviada a 65 investigadores alemanes prominentes solicitándoles su firma. Dieciséis de los destinatarios nunca le contestaron y veintiuno de ellos se negaron a firmar. Entre los que tuvieron el coraje de firmar el documento estaban Max Planck, Max von Laue, Sommerfeld y Heisenberg, pero el escrito fue inútil. Courant comprendió finalmente que era una locura quedarse en la Alemania nazi. Partió hacia Estados Unidos y fue profesor de la Universidad de Nueva York entre 1934 y 1958.

Heisenberg, que en 1927 se había convertido en profesor en Leipzig y que en 1933 había ganado reputación en todo el mundo al recibir el premio Nobel de física por su trabajo sobre la relación de incertidumbre, evaluó su renuncia como protesta, pero se mantuvo en el cargo con la esperanza de que sirviera de algo. Pensó que esa locura duraría poco.

En su condición de presidente de la sociedad Kaiser-Wilhelm trató de encontrar a Max Planck, y por cuestión de protocolo invitó al nuevo jefe de estado, Adolf Hitler. Aprovechó la oportunidad para felicitar a Fritz Haber por sus aportes durante la guerra, pero debió enfrentar un arrebato de cólera de Hitler. “Todos los judíos son iguales”, gritó Hitler, “se agarran como sanguijuelas”. Planck le diría luego a Heisenberg (según Powers):

... Temo que ya no le puedo seguir dando consejos. No veo esperanza alguna para detener esta catástrofe que aflige a nuestras universidades, a todo el país. — No se puede detener un alud cuando comienza. [...] Por ello lo único que puedo decirle es esto: Haga lo que haga, hay escasas esperanzas de impedir accidentes pequeños antes de que la gran catástrofe haya finalizado. Pero piense en lo que vendrá después.

Otto Hahn también buscó a Planck para intentar organizar una protesta masiva de científicos alemanes, pero Planck consideró que ya era demasiado tarde. Dijo Planck:

“Si 30 profesores nos paramos hoy y protestamos contra las medidas del gobierno, mañana habrán 150 que van a solidarizarse con Hitler, simplemente porque buscan trabajo.”

La aversión de Heisenberg contra lo que sucedía hizo que se ganara muchos enemigos. Su

negativa a afiliarse al partido nazi no facilitó las cosas. Sus problemas personales fueron creciendo. Su esperanza era suceder a Arnold Sommerfeld en el cargo en Munich, cuando éste se jubilara. La facultad lo consideraba a él junto con otros dos candidatos posibles, pero el ministerio de educación descartó su nombre: su contacto estrecho con Bohr y Einstein lo habían convertido en un sospechoso y además no integraba el partido.

Heisenberg se vio sometido a ataques cada vez más enconados, principalmente de los colegas físicos Philipp Lenard y *Johannes Stark* (1874–1957), que detestaban la nueva física. En 1935 Lenard publicó su gran obra *Deutsche Physik* de cuatro tomos. En su prefacio habla de “la física alemana” en contraposición con la “física judía”. Él escribió (citado de la obra *En las huellas de Demócrito*):

¡Uno se pregunta sobre la física alemana! También podría haber escrito sobre la física aria o la física del ser humano nórdico, la física del investigador de la realidad, la del buscador de la verdad o la de aquellos que han sentado las bases de la investigación de las ciencias naturales. “La ciencia es y será internacional”, me objetarán. ¡Pero eso es un error! En realidad la ciencia está, al igual que todo lo que realiza el ser humano, condicionado por los lazos de raza y sangre. [...]
La gente que tiene otra mezcla de razas está preconcebida para realizar otro tipo de ciencia. Todavía no se conoce nada acerca de la física de los negros. Sin embargo, una curiosa física judía se ha desarrollado por todas partes.

Lenard ataca luego a Einstein como el principal representante de “la física judía”, en contraposición con “la indomable y minuciosa voluntad del investigador ario de atenerse a la verdad”.

En diciembre de 1935 Stark dio un discurso en una ceremonia de bautismo de la institución de física de Heidelberg en honor a Lenard, y allí atacó a Heisenberg. Éste respondió con una buena defensa de la física teórica y la teoría de la relatividad en un artículo en febrero de 1936, en el órgano del partido nazi *Völkischer Beobachter*. La redacción publicó, sin embargo, un nuevo ataque de Stark, quien desestimó el artículo de Heisenberg acusándolo de engaños judíos.

La persecución de Stark contra Heisenberg culminó en julio de 1937 con un artículo en la publicación de las SS *Das Schwarze Korps* en el que afirmó que Heisenberg era un “judío blanco”. En ese mismo ejemplar se publicó una recomendación: los judíos blancos como Heisenberg debían “desaparecer”. Fue una amenaza que Heisenberg tomó muy seriamente.

El abuelo materno de Heisenberg había sido maestro en la misma escuela que el padre del jefe de las SS, *Heinrich Himmler*, y habían sido buenos amigos. Por eso Heisenberg le pidió a su madre que se contactara con la madre de Himmler, una viuda de alrededor de 70 años. La señora Himmler afirmó:

Dios mío, si mi Heinrich supiese esto, haría algo al respecto y de inmediato. Hay algunas personas un poco desagradables en torno a Heinrich, pero esto es detestable. Se lo voy a contar a mi Heinrich. Él es un chico considerado: siempre me felicita para mi cumpleaños, me envía flores y esas cosas. Basta con que le diga una palabra para que él solucione todo esto.

Con la recomendación de la señora Himmler, Heisenberg escribió el 21 julio de 1937 a Himmler y protestó contra las persecuciones de Stark. Le explicó que se vería obligado a renunciar a su cátedra en Leipzig si Himmler no podía detener los ataques en el periódico de las SS. Himmler contestó recién en noviembre, alentando a Heisenberg a defenderse de los ataques.

Otros salieron en su defensa, entre ellos, Ernst von Weizsäcker. Las SS realizaron una investigación bajo la supervisión de *Reinhard Heydrich*, el hombre más próximo a Himmler y jefe de la Gestapo. Heisenberg fue citado a declarar en numerosas oportunidades al cuartel central de la Gestapo en Berlín. La investigación finalizó recién el 21 julio de 1938 y Himmler le escribió a Heisenberg afirmando que había sido declarado libre de todo cargo y que no sería objeto de nuevos ataques. La investigación había sido tan exhaustiva debido a la recomendación de la madre de Himmler. Sin embargo Heisenberg no podría suceder en el cargo a Sommerfeld, ya que Rudolf Hess se opuso por “motivos políticos”.

Heisenberg se había salvado y estaba atemorizado. Había estado más cerca de la muerte de lo que él suponía. El mismo día en que Himmler le escribió a Heisenberg, también le escribió a Heydrich y explicó que “Heisenberg era una persona decente y que no podemos darnos el lujo de perderlo o matar a este hombre tan joven todavía y que aún puede crear una avanzada generación científica”. Heisenberg evitó la muerte, pero ¿qué es lo que podía hacer?

18 | El descubrimiento del núcleo atómico

Ahora que tenemos algunos conocimientos acerca de la física teórica, la podemos relacionar con la experimental y volver al profesor Rutherford y sus colaboradores de la universidad de Manchester. Reanudamos el relato en marzo de 1911, justo después de que Rutherford hiciera pública su declaración acerca de la comprobación de Geiger y Marsden según la cual las partículas pueden rebotar incluso contra una fina lámina de oro. Los átomos demostraron tener núcleos. Nuestra próxima tarea es descubrir la naturaleza de los núcleos.

Había una vieja hipótesis que podía ayudarnos. En 1815 un médico y químico inglés, *William Prout* (1785–1850), había supuesto que todos los átomos estaban constituidos por átomos de hidrógeno. Descubrió que los pesos atómicos de los elementos parecían ser múltiplos enteros del peso atómico del hidrógeno.⁽¹⁾ Coincidió con muchos elementos, tales como helio, carbono, oxígeno, fósforo, azufre, calcio, hierro, cobalto y arsénico pero no con otros, tales como el silicio, el cloro y el cobre.

Sin embargo la idea era atractiva. Si el átomo de hidrógeno, o mejor dicho, su núcleo, *el protón* (del griego *protos* = primero), era un elemento presente en toda materia, ¿qué podía ser más fácil? Si éste era el caso, se había encontrado el átomo de los átomos.

Pero el átomo de hidrógeno tiene solo un electrón. Su núcleo solo puede tener una carga eléctrica positiva. El modelo atómico de Bohr y el resultado espectrométrico de rayos X de Moseley exigía que los átomos más pesados tuvieran núcleos con cargas nucleares de Z veces la carga nuclear de los átomos de hidrógeno, si Z era un número ordinal del sistema periódico, es decir, un número atómico. Si la hipótesis de Prout era correcta, el número atómico sería entonces igual al peso atómico (que es un número sin dimensiones, si se calcula con relación al peso del átomo de hidrógeno). Pero para otros elementos diferentes al hidrógeno el peso atómico es más o menos el doble del número atómico, y para los átomos pesados es aún mayor.

Por eso el núcleo atómico no podía estar compuesto solo de protones. Todavía no se sabía si existían algunos protones en otros núcleos atómicos que no fuera el hidrógeno, pero si era así, se debía neutralizar la carga positiva de aproximadamente la mitad de ellos, por ejemplo, mediante la existencia de electrones en los núcleos. No era ninguna idea rebuscada, ya que algunos elementos radiactivos emitían electrones en forma de radiación β . En el berilio, por ejemplo, con peso atómico 9 y número atómico $Z = 4$, se deberían neutralizar con electrones dentro del núcleo (si el núcleo estaba compuesto por protones), ya que visto exteriormente tiene 4 cargas positivas.

Parecía que la hipótesis del doctor Prout de 1815 no era tan tonta (¿quizá los protones deberían haber sido llamados “proutones”?). Pero había una objeción. ¿Cómo explicar los pesos atómicos que no eran múltiplos enteros del átomo de hidrógeno? Por ejemplo, el peso atómico del cloro era 35.5.

Había propuestas para explicarlo. Ya en 1909 los suecos *The Svedberg* (1884–1971) y *Daniel Strömholm* (1871–1961) probaron la posibilidad de que existieran varios tipos de átomos de cada elemento. Por cierto, ahora ya se tenía bastante experiencia con los elementos radiactivos y se vio que existían diferentes propiedades físicas (período de semidesintegración, tipo de radiación) en clases de átomos que tenían las mismas propiedades químicas. Soddy había llamado *isótopos* a esas clases de átomos que tenían el mismo lugar en el sistema periódico.

(1) *El peso atómico* es una vieja denominación de la masa atómica relativa, es decir, el número que indica la masa de un átomo en relación con el átomo de referencia. Prout utilizó el átomo de hidrógeno como referencia. Luego se ha utilizado oxígeno-16 como referencia y se ha llamado a su peso atómico exactamente 16. Actualmente se usa el carbono-12 como referencia y su peso atómico es por ello exactamente 12. En química se indica el peso atómico de un elemento como el peso atómico medio de su mezcla de isótopos naturales. En la naturaleza el carbono (98,9% carbono-12 y 1,1% carbono-13) tiene por ello el peso atómico 12,011.

Puesto que tenían el mismo número atómico (Z), tenían la misma carga nuclear. Lo que se esperaba que fuera diferente era el número de partículas nucleares neutralizadas, es decir, la cantidad de “neutrones”. Pero por ahora eran hipótesis. Nadie había demostrado todavía la existencia de esa partícula. Nadie tampoco había demostrado que los núcleos atómicos contienen protones, es decir núcleos de átomos de hidrógeno.

En los comienzos no se sabía si la existencia de isótopos estaba limitada a elementos radiactivos o si también podían existir isótopos estables. Pero en 1912, es decir, antes de que Soddy propusiera la denominación “isótopo”, J.J. Thomson demostró que existían dos isótopos del neón. Él había ionizado el gas y acelerado los iones de neón en un tubo de descarga, en el cual permitió que una corriente de iones penetrara a través del cátodo como “rayos canales” (véase el cap. 6) y luego intentó curvar el rayo en campos eléctricos y magnéticos. Debido a la masa diferente de los isótopos, las curvaturas eran diferentes y Thomson pudo calcular la masa de los iones. Descubrió que el neón estaba compuesto por dos clases de átomos con los pesos atómicos 20 y 22, respectivamente. Parecía que el Dr. Prout tenía razón.

Hoy sabemos que el peso atómico 35,5 del cloro se debe a que éste se presenta en forma de dos isótopos estables con los pesos atómicos 35 y 37 y la abundancia relativa es de 75% y 25% respectivamente. Esto le da al peso atómico para la mezcla la siguiente igualdad: $0,75 \times 35 + 0,25 \times 37 = 35,5$ (para simplificar, he redondeado el número de la abundancia). La mayoría de los elementos muestran isótopos estables, si bien algunos isótopos tienen una abundancia bastante escasa.

Después de la guerra, en 1919, cuando Rutherford dejó Manchester para ser profesor en Cambridge y suceder a J.J. Thomson en el cargo de director del laboratorio Cavendish, era hora de evaluar el próximo gran descubrimiento del grupo Rutherford. Al igual que otros grandes inventos, éste comenzó como una observación inexplicable, como un trastorno irritante de un experimento. Muchos investigadores piensan que no vale la pena lamentarse si un experimento arroja un resultado erróneo. Es mejor corregir el error y razonar del siguiente modo: “Si esto es así, de esta manera extraña, ¿puedo sacar algún provecho de ello?” Se trata de utilizar “las leyes del arte marcial de la investigación”: aprovechar la fuerza y el movimiento del atacante para vencerlo.

Todo comenzó con Ernest Marsden, en 1915, en un experimento de rutina en el que presencié una observación inexplicable. Para el experimento utilizó un preparado radiactivo α en una cámara hermética. En un extremo de la cámara había una pantalla de sulfato de zinc que emitía fluorescencia, si alguna partícula rica en energía chocaba contra ella. Él extrajo el aire de la cámara con una bomba y la llenó luego con hidrógeno. Cuando las partículas α chocaban contra los átomos de hidrógeno más livianos, los empujaban contra la pantalla donde se podían observar destellos luminosos. La pantalla podía protegerse contra las partículas α cubriéndola con una lámina fina, de tal modo que solo fuera alcanzada por los átomos de hidrógeno.

Lo que sorprendió a Marsden fue descubrir centelleos en la pantalla mientras evacuaba la cámara y todavía no había sido llenada con hidrógeno. Parecía que el preparado de radiación α emitía además núcleos de átomos de hidrógeno de altas dosis de energía (se las llamaba entonces “partículas H”). Rutherford ya había descubierto la radiación α y β . ¿Existía también una radiación natural H?

Marsden dejó a Rutherford en 1915 para regresar a Nueva Zelanda y Rutherford estaba con mucho trabajo durante la guerra, razón por la cual no tenía tiempo para realizar un seguimiento de las observaciones de Marsden. Sin embargo estudió los resultados de Marsden de vez en cuando, y los pudo repetir. Quizá eso se debía a que, a pesar de todo, había hidrógeno

presente. Descubrió que los centelleos disminuían si llenaba la cámara con oxígeno o dióxido de carbono, pero para su sorpresa los centelleos eran mayores cuando tenía aire en la cámara. Eran iguales en intensidad a los causados por los átomos de hidrógeno que impactaban cuando llenaba la cámara con hidrógeno.

Finalmente Rutherford extrajo la conclusión de que lo que impactaban contra la pantalla de sulfuro de zinc eran átomos de hidrógeno, generados cuando las partículas α chocaban contra el nitrógeno del aire. Al “bombardear” átomos de nitrógeno con partículas α , es decir, núcleos de átomos de helio, había separado los núcleos de nitrógenos en oxígeno e hidrógeno. Rutherford había generado la primera reacción nuclear jamás realizada por persona alguna.

El núcleo del átomo de helio tiene peso atómico 4, mientras que el nitrógeno tiene un peso atómico de 14. Si la colisión creó un átomo de hidrógeno de peso atómico 1, debe haber un peso atómico restante de 17. El núcleo del átomo de helio había tenido dos unidades de carga eléctrica positivas, el nitrógeno con número atómico 7 había tenido siete cargas. El núcleo del hidrógeno había impactado con una carga. Restaban $2+7-1 = 8$ cargas. El producto residual debía tener número atómico 8 y ser oxígeno, un isótopo de oxígeno con peso atómico 17. No se había observado en la naturaleza, pero estaba allí, si bien en muy poca cantidad.

Recién en 1919 Rutherford se atrevió a interpretar sus observaciones. “Debemos extraer la conclusión de que los átomos de nitrógeno se han degradado...” Su informe generó titulares en los periódicos acerca de la “fisión del átomo”, pero eso no era correcto. Sin embargo él había logrado separar un núcleo de hidrógeno del núcleo atómico del nitrógeno.

Faltaba una confirmación de que dentro del núcleo del átomo existían también las partículas neutrales que exigían explicar la relación entre la masa de los átomos y la carga eléctrica. Rutherford reparaba en la posibilidad de que existieran electrones incluso dentro del núcleo atómico, en una cantidad adecuada para neutralizar la carga positiva de tantos núcleos atómicos de hidrógeno, y suficiente para que la carga positiva restante fuera la esperada.

Rutherford consideraba a esos protones neutralizados (es decir, el sistema compuesto por un protón y un electrón) como una partícula especial, neutra, que en 1920 denominó neutrón. Acerca de esa todavía hipotética partícula afirmó en una conferencia el 3 junio de 1920 (“the Bakerian Lecture”) ante la Royal Society:

Bajo determinadas circunstancias debería ser posible que un electrón y un núcleo de un átomo de hidrógeno (protón) construyan un sistema de dos partículas mucho más estable que el átomo de hidrógeno. Ya que este sistema no se rodea de un campo de fuerzas exterior, se podría mover libremente en toda materia. Su presencia apenas podría ser demostrada con un espectrógrafo y no sería posible colocarlo en ningún recipiente. Por otra parte podría introducirse sin previo aviso en la estructura del átomo y unirse al núcleo o descomponerse en su campo eléctrico fuerte. La existencia de esas partículas, los neutrones, parece inevitable para explicar la estructura de los átomos de los elementos pesados, ya que si no suponemos que en el universo existen partículas cargadas muy rápidas es muy difícil percibir como alguna partícula positiva pueda alcanzar alguna vez a los núcleos de átomos muy pesados, allí donde deben resistir al fuerte campo repulsivo de los núcleos.

Un neutrón del tipo que Rutherford se imaginó, tendría aproximadamente la masa del protón y ser el “protón neutral” que se necesitaba para lograr que las relaciones entre el número atómico y el peso atómico concordaran.

Cuando Rutherford llegó a Cambridge y al laboratorio Cavendish para suceder en el cargo a J.J. Thomson en 1919, lo acompañó un joven físico de Manchester, *James Chadwick*

(1891—1974). El anterior colaborador de Rutherford, Hans Geiger, había regresado a Berlín inmediatamente antes de la guerra y Chadwick, que había obtenido una beca después de haber logrado en 1913 una maestría en Manchester, había viajado allí para visitarlo y conocer a famosos investigadores como Einstein y Hahn. Cuando se desató la guerra en 1914, Chadwick no pudo viajar a su hogar sino que fue internado en un campo de prisioneros en Ruhleben, cerca de Spandau. Había sido recientemente liberado cuando acompañó a Rutherford hasta el laboratorio Cavendish.

Un colaborador que Rutherford recibió de Thomson fue *Francis William Aston* (1877—1945). Aston obtuvo el premio Nobel de química en 1922. En 1921 llegó otro futuro ganador del Nobel a Cambridge: *Pjotr Kapitsa* (1894—1984), el físico más eminente de Rusia.

Aston recibió el premio Nobel por su “espectrógrafo de masas, gracias al cual se realizaron descubrimientos de un gran número de relaciones isotópicas de los elementos radiactivos”, descubrimientos que crearon la base para la comprensión de la estructura del núcleo atómico. El espectrógrafo de masas se basó en el descubrimiento de J.J. Thomson en 1913, según el cual un haz de rayos canales podía descomponerse por un campo combinado eléctrico y magnético, de tal modo que los iones con diferente masa se desviaban de manera diferente. Aston construyó el primer espectrógrafo de masas según este principio.

Chadwick había llegado a ser físico por error. Cuando se inscribió en la universidad de Manchester, se puso en la cola equivocada para dar un examen oral de ingreso de matemática. Cuando llegó hasta el profesor y le formuló algunas preguntas, se dio cuenta de que le estaban preguntando sobre física y no sobre matemática. No corrigió el error, ya que el profesor le resultó interesante y pensó que sería fastidioso explicar la equivocación.

Rutherford, que en un primer momento predijo la existencia de neutrones con gran entusiasmo, comenzó a perderlo cuando los núcleos atómicos comenzaron a burlarse de los investigadores. En una tesis escrita en 1927 dijo: “Ahora lo único que podemos hacer es adivinar la estructura de los átomos más livianos y probablemente menos complicados.” Pero un año después las cosas empezaron a cambiar.

En Alemania el físico *Walther Bothe* (1891—1957) se siguió basando en el método de Rutherford, extrayendo protones de los núcleos atómicos de elementos livianos con la ayuda del bombardeo de rayos α . Junto con su colaborador *Heinrich Becker* (1911—1942) registró la radiación γ que surgía de la irradiación de boro, magnesio y aluminio después de reacciones atómicas equivalentes a las descubiertas por Rutherford al irradiar nitrógeno. Esto no era ninguna sorpresa. Sin embargo descubrieron que aquello que ellos creían que era radiación γ en la irradiación de berilio tenía una inesperada capacidad de alta penetración. Además, después de la irradiación de berilio no pudieron descubrir ningún protón. Bothe y Becker escribieron sobre sus inesperados hallazgos en agosto y diciembre de 1930.

La hija de Marie Curie *Irène* (1897—1956) se había casado en 1927 con el físico químico *Frédéric Joliot* (1900—1958). Desde 1929 comenzaron a trabajar juntos y repitieron los experimentos alemanes con berilio. El 28 de diciembre de 1931 Irène Joliot-Curie pudo informar sus primeros resultados a la academia de ciencias francesa. La mística radiación de berilio era aún más energética que la descubierta por los alemanes.

Los esposos Joliot-Curie continuaron sus estudios sobre las propiedades de la nueva radiación. ¿Podía generar reacciones nucleares? Utilizaron una cámara de ionización con una ventana fina para que las partículas también pudieran penetrar en la cámara y generar una ionización mensurable. Frente a la ventana colocaron los diferentes materiales que fueron expuestos a la radiación del preparado de berilio que se irradiaba con radiación α . Descubrieron que los

materiales irradiados expulsaban protones, pero solo si contenían átomos de hidrógeno, tales como en la parafina. Parecía que la radiación del berilio empujaba a los átomos de hidrógeno fuera de la parafina. Sin embargo la pareja de investigadores franceses no comprendían el contexto: creían que la radiación del berilio era muy rica en radiación γ . El 18 de enero de 1932 informaron a la academia de ciencias que la parafina expulsaba protones de gran energía si eran sometidos a "radiación γ muy penetrante". De esa manera perdieron la oportunidad de descubrir el neutrón, tal como le sucedió a Bothe y Becker. Miraron sin ver.

Cuando el informe en *Comptes Rendus* llegó al laboratorio Cavendish a comienzos de febrero de 1932, Chadwick y Rutherford no podían creer lo que estaban viendo. Uno de sus colaboradores, *Norman Feather* (1904–1978), también estaba sorprendido y luego Chadwick escribió lo siguiente:

Algunos minutos más tarde llegó Feather a mi habitación para contarme acerca del informe, y estaba tan sorprendido como yo. Esa misma mañana se lo conté a Rutherford. Era habitual que lo visitara alrededor de las 11 para contarle las noticias interesantes y discutir el trabajo que se estaba realizando en el laboratorio. Cuando le conté las observaciones de Curie-Joliot y sus opiniones, vi su asombro y finalmente exclamó: "¡No lo creo!" Esa expresión intolerante no era común en él y en todo mi trato con él no recuerdo nada igual. Lo menciono para darle relevancia a la importancia inspiradora que tuvo el informe de Curie-Joliot. Rutherford estuvo de acuerdo en que las observaciones debían ser aceptadas. Pero explicarlas era una cuestión totalmente diferente.

Chadwick (que había hecho un experimento similar simultáneamente con la investigación que se realizaba en Alemania y Francia) podía ahora continuar con buen ánimo su trabajo: sabía lo que buscaba. Su experimento anterior se había visto dificultado por no contar con una fuente de radiación α apropiada. Las fuentes de radiación que utilizó (radio, radón y productos hija) no emitían solo radiación α sino también radiación γ , lo cual interfería las mediciones. La pareja Joliot-Curie tenía acceso a grandes cantidades de polonio. Las ampollas de vidrio con radón habían tenido un gran uso medicinal como fuentes de radiación γ de corta vida. Cuando todos los demás productos hija se habían degradado, restaba plomo 210 ("radio D") en las ampollas de larga vida, que no tiene radiación γ de mucha energía, y que en su momento y a través del tiempo de vida relativamente corto del bismuto 210 ("radio E") crea una cantidad en equilibrio de polonio 210, la que emite radiación α . Las ampollas de vidrio eran a menudo devueltas al radioinstituto Marie Curie, que así obtenía grandes cantidades de polonio.

En 1930 el laboratorio Cavendish tuvo acceso a cientos de ampollas de radón utilizadas, provenientes del hospital Kelly en Baltimore (donde Norman Feather había pasado un año sabático). Chadwick separó el polonio durante el otoño de 1930 y así obtuvo una fuente utilizable de radiación α .

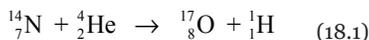
Desde el 7 hasta el 17 de febrero de 1932 Chadwick trabajó febrilmente y casi ininterrumpidamente en la búsqueda del neutrón y solo se permitió algunas horas de sueño cada noche. Comenzó a repetir el experimento de Joliot-Curie para asegurarse de que las partículas (debido a la supuesta radiación de neutrones) que salían de la parafina eran verdaderamente protones. Luego continuó permitiendo que la radiación del berilio impactara otros elementos diferentes a la parafina y pudo demostrar que esa radiación no podía estar constituida por radiación γ , tal como se pensó en París.

El 17 de febrero envió un mensaje a la publicación *Nature* bajo el título "Posible existencia de un neutrón", donde él extrae la conclusión de que la mística radiación del berilio está

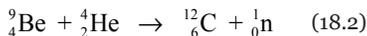
constituida por el “neutrón” que Rutherford debatió en su Bakerian Lecture en 1920. Se había descubierto el neutrón.

El descubrimiento de Chadwick se festejó en la noche de ese mismo día en el club “Kapitsa”. Después de un tiempo en Cambridge, Pjotr Kapitsa pensó que los estudiantes de física eran demasiado humildes con relación a sus profesores, del mismo modo que los profesores lo eran con relación a sus colegas de mayor edad. Por eso creó un club cerrado de debate. Muchos querían ser miembros de esta institución. Kapitsa comenzaba a menudo los debates metiendo la pata intencionalmente, para que nadie dudara en contradecirlo. La noche del 17 de febrero, Kapitsa cenó con Chadwick y luego lo llevó al club donde Chadwick brindó un informe de los descubrimientos, expresó su aprecio por los investigadores alemanes y franceses que habían estado tan cerca del éxito y finalmente exclamó: “¡Ahora quiero que me den cloroformo y me acuesten en una cama durante 14 días!”

Pronto se aceptó que todos los núcleos atómicos estaban compuestos por protones y neutrones. Heisenberg lo propuso inmediatamente después del descubrimiento de Chadwick, pero es lo que Rutherford había supuesto durante mucho tiempo. Ahora se podía introducir un nuevo término, *el número másico* (A), que indica cuántos *nucleones* (es decir, protones y neutrones) forman el núcleo. Ahora se consideraba que toda materia estaba construida por tres *partículas elementales* (en realidad serían muchas más): electrones, protones y neutrones. La cantidad de protones, y con ello la cantidad de unidades de carga eléctricas positivas en el núcleo, se representaba con Z, un número que también determinaba cuántos electrones se encuentran normalmente en el átomo fuera del núcleo, e influyen en las propiedades químicas del átomo. Un nucleído del elemento X con A nucleones, de los cuales Z son protones, podía representarse ${}^A_Z\text{X}$. La primera reacción nuclear de Rutherford, cuando con ayuda de un núcleo del átomo de helio (partícula α) se desprendía un núcleo de hidrógeno (protón) del nitrógeno, podía escribirse como



De manera semejante el lanzamiento de un neutrón de un preparado de berilio irradiado con α puede representarse de este modo:



En realidad era innecesario escribir el número atómico Z ya que los símbolos de los elementos químicos (N, He, O y H) también determinan inequívocamente de qué elemento se trata. Sin embargo, en una fórmula como la citada puede facilitar un control rápido no solo del número de nucleones sino mostrar también que las cargas nucleares en total son las mismas tanto antes como después de la reacción.

Quizá sea adecuado volver a recordar los términos nucleído e isótopo. Los tipos de átomos



son todos *nucleídos*, mientras que hidrógeno 1 e hidrógeno 2 (como también puede escribirse) son *isótopos* del hidrógeno (el mismo valor de Z, las mismas propiedades químicas), así como cloro-35 y cloro-37 son isótopos del cloro. El berilio existe estable en la naturaleza solo en forma de nucleído berilio 9, que no tiene ningún isótopo estable. Sin embargo se

forma permanentemente ${}^7_4\text{Be}$ radiactivo de corta vida en la atmósfera mediante reacciones nucleares con la radiación cósmica. El nucleído está compuesto por lo tanto por 4 protones y $7 - 4 = 3$ neutrones.

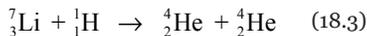
En el lenguaje coloquial se suele llamar por error “isótopo” al “nucleído”. Se puede decir de manera correcta, por ejemplo, que el “berilio 7 es un isótopo radiactivo del berilio” lo cual significa más exactamente que “el nucleído berilio 7 es un isótopo radiactivo del berilio”. Si solo se dice que el “berilio 7 es un isótopo radiactivo” está sobreentendido que es de berilio. Es incorrecto afirmar que el “berilio 9 es un isótopo”. El berilio 9 es un nucleído.

Después del descubrimiento del neutrón, la investigación nuclear tomó un nuevo impulso. Hans Bethe (no confundirlo con Bothe), ha dicho que el período anterior a 1932 es “la prehistoria de la física nuclear, y en 1932 comienza la historia de la física nuclear”. No solo el descubrimiento del neutrón que realizó Chadwick en 1932 fue sensacional. Otro descubrimiento notable se realizó el mismo año en el laboratorio Cavendish.

Se habían buscado proyectiles más adecuados que el pesado núcleo del átomo de helio con su doble carga eléctrica. El protón, más liviano y con una carga simple, sería adecuado pero ¿cómo proporcionarle energía suficientemente alta? Se necesitaba un “cañón de protones”.

Nuevamente los precusores fueron los investigadores del laboratorio Cavendish: *John Cockcroft* (1897–1967) y *Ernest Walton* (1903–1995). Ellos construyeron por un lado una fuente de protones adecuada en la que el hidrógeno se ionizaba mediante una descarga en el gas, y por el otro un generador de alta tensión que podía generar tensiones eléctricas de hasta un millón de voltios (yo mismo trabajé con uno de esos generadores en 1950).

Con protones acelerados por una tensión de 0,6 millones de voltios, Cockcroft y Walton bombardearon litio en 1932, logrando de inmediato una reacción nuclear:



De hecho esta fue la primera fisión nuclear experimental del mundo. Del átomo de litio se habían formado dos átomos de helio. Pero en realidad la reacción era imposible. Un cálculo de cuánta energía era necesaria para que el protón penetrara en el núcleo de litio contra las fuerzas coulombianas repulsivas demostró ser de aproximadamente 1,24 MeV mientras que los protones utilizados solo tuvieron una energía de 0,6 MeV.⁽²⁾ Pero esta barrera solo era efectiva en el mundo de la física clásica. Si en su lugar se establece una visión mecánico ondulatoria, resulta que existe una cierta probabilidad de que una partícula pueda atravesar la barrera: el así llamado *efecto túnel*.

A la inversa, algunos de los nucleones que forman el núcleo atómico tienen cierta probabilidad de que se fuguen del núcleo por el efecto túnel, a pesar de las fuerzas normalmente centrípetas. Ahora sabemos que esta norma no se aplica a los protones o neutrones individuales pero sí a las partículas α , es decir, una configuración de dos protones y dos neutrones. Lo que hace radiativos alfaemisores a los átomos más pesados es la pequeña probabilidad de que las partículas α se escapen. En la actualidad se sabe que aún las configuraciones más pesadas de nucleones pueden escaparse mediante el efecto túnel, pero con mucha menor probabilidad (un ejemplo es el carbono 14). Que las partículas alfa en particular puedan escapar, es algo que fue demostrado teóricamente en la década de 1920 por el físico soviético *George Gamow*

(2) Un electronvoltio (eV) es la energía cinética que una partícula con una unidad de carga eléctrica recibe luego de haber sido acelerada en el vacío por una diferencia de potencial eléctrico de 1 voltio. Por lo tanto 1 MeV (un megaelectronvoltio) es la energía cinética que esa partícula recibe luego de ser acelerada por un millón de voltios. La energía 1 eV es igual a $0,160217733 \cdot 10^{-18}$ joule.

(1904–1968). Gamow tenía un doctorado en física de la universidad de la entonces Leningrado, pero a fines de la década de 1920 realizó un viaje de estudios a Europa occidental, y visitó entre otros a Niels Bohr en Copenhague. Regresó en 1931 a Leningrado para ocupar un cargo en la academia de ciencias.

También se demostró que las partículas, por ejemplo, los protones o las partículas alfa, que son expulsadas en las reacciones nucleares pueden recibir elevadas energías cinéticas. En la fisión del átomo de litio de Cockcroft y Walton en dos núcleos de átomos de helio (es decir partículas alfa) descubrieron que cada una de ellas tenía una energía cinética de aproximadamente 9 MeV. El famoso profesor de Edimburgo y autor de obras de divulgación científica *Ritchie Calder*⁽³⁾ tomó nota de la respuesta de Rutherford después de que Calder notara que invertir la energía de 0,6 MeV para obtener 18 MeV era un buen canje. Rutherford respondió: “Eso es un disparate. Solo un protón entre diez millones tiene una probabilidad de alcanzar al núcleo. Es como dispararle a una hormiga en una noche muy oscura y utilizar diez millones de disparos para eso.”

Rutherford parecía convencido de que se necesitaría en total más energía para generar una fisión nuclear, que lo que se podría lograr de ella. Pero, ¿de dónde provenía la energía cuando la fisión realmente tenía lugar? La energía a la que se había apostado con un disparo malogrado se había perdido completamente.

La explicación estaba en la teoría de la relatividad de Einstein, que dice que la masa y la energía son equivalentes y que la masa de un cuerpo es por eso también una medida de su contenido de energía. Así como la masa enmascaraba la energía en un cuerpo, según la teoría de la relatividad la energía asociada a un cuerpo en reposo es igual a la masa en reposo del cuerpo multiplicada por el cuadrado de la velocidad de la luz, $E = m_0 c^2$. Cuando se dijo esto por primera vez en 1905 era una especulación abstracta, pero ahora comenzaba a tener un significado práctico.

Einstein había recibido un apoyo decisivo para sus teorías en 1919. A comienzos de la I Guerra Mundial, en 1915, Einstein predijo, haciendo referencia a su teoría de la relatividad general, que la luz de las estrellas se curvaba cuando pasaba cerca de una gran masa como, por ejemplo, nuestro Sol. Esa predicción podía ser comprobada durante un eclipse de sol. La guerra se interpuso, pero después de ella hubo un eclipse total de sol el 29 de mayo de 1919. Varios observatorios enviaron expediciones a lugares adecuados y la curvatura pudo ser observada. J.J. Thomson constató: “No es un descubrimiento de una isla aislada sino todo un continente de nuevas ideas científicas.” A comienzos de la década de 1930 Einstein era un reconocido y respetado científico (excepto por los racistas nazis que lo odiaban por ser judío).

La fórmula de Einstein dice que un kilogramo de materia, de cualquier clase, es equivalente a aproximadamente 25 mil millones de kilovatios hora (25 teravatios hora, Twh) ¡Una enorme fuente de energía para extraer, siempre que se supiera cómo hacerlo! Si en su lugar indicamos la energía en electronvoltios, podemos calcular que la unidad de masa del sistema de peso atómico (actualmente 1/12 de la masa de carbono 12) responde a una energía de 931,16 MeV.⁽³⁾ En la fisión del átomo de litio, los núcleos de átomos de helio recién formados tenían en forma conjunta una energía cinética de 18 MeV. Según la teoría de Einstein eso significaría que una masa de $18/931,16 = 0,019$ unidades de masa atómica se convierte en energía.

Esto se podía verificar. El núcleo de litio (litio 7) tiene una masa de 7,017 unidades de masa y el protón 1,008 unidades de masa. Por consiguiente tienen juntos 8.025 unidades de masa.

(3) Quien luego sería lord Ritchie-Calder, conocido también por haber sido presidente del comité que preparó a Gran Bretaña para pasar al sistema decimal.

El núcleo de helio tiene una masa de 4,003 unidades de masa y por lo tanto dos núcleos de helio tienen juntos 8,006 unidades de masa. La diferencia es de 0,019 unidades de masa. La teoría de Einstein había sido comprobada una vez más. La vieja ley sobre la conservación de la energía se aplicaba ahora solo si se equiparaba la energía con la masa.

Ahora se podían realizar comparaciones entre la masa total de los nucleones que forman un núcleo atómico determinado y la masa medida de ese núcleo. Entonces se encontró una diferencia. Los núcleos atómicos resultaron tener masas que eran menores al total de las masas de los “componentes”. La diferencia suele llamarse *defecto de masa* (M_B) y equivale a una cantidad de energía denominada *energía de enlace del núcleo* (B). La energía de enlace es la energía que se libera cuando un número de protones y neutrones libres se unen en un núcleo atómico, pero también la energía absorbida para descomponer el núcleo en nucleones completamente libres.

Lo que es decisivo para la estabilidad de un núcleo atómico no es su energía de enlace total, sino la energía de enlace por nucleón, es decir, B/A. Con excepción de algunos de los núcleos más livianos <deuterio (hidrógeno 2), helio 4, litio 6> la energía de enlace por nucleón es de alrededor de 8 MeV. El átomo de hidrógeno común carece de energía de enlace. Éste se encuentra constituido solo por un nucleón.

Si lo que se desea es recuperar energía de la masa, estas relaciones no parecen a primera vista muy prometedoras. La energía se obtiene mediante la reconstitución de los nucleones y no mediante la descomposición o fisión de átomos en nucleones. Pero la fisión del átomo de litio de Cockcroft y Walton da una pista. El átomo de litio no se descomponía en nucleones sino en dos átomos de helio 4, que tienen una menor energía de enlace por nucleón que el átomo de litio y el protón juntos.

La mayor energía de enlace por nucleón se encuentra en los nucleídos con número másico entre 30 y 90. Esto implica que una fisión de núcleos pesados resultante en productos de fisión con menores números másicos libera energía. Pero también es posible acercarse a las energías de enlace más altas y a los números másicos entre 30 y 90 mediante la reconstitución de los núcleos atómicos (“fusión”) de nucleídos livianos.

La masa de un núcleo puede escribirse como

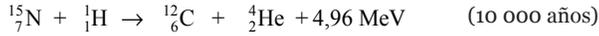
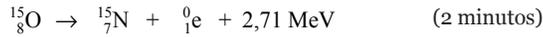
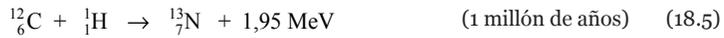
$$M = Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - M_B \quad (18.4)$$

Los primeros dos términos después del signo “igual” suman las masas de los Z protones y (A - Z) neutrones que forman parte del núcleo y que tienen las masas m_p y m_n respectivamente. El tercer término es el defecto de masa equivalente a la energía de enlace $B = M_B c^2$. Carl Friedrich von Weizsäcker describió en un artículo en la publicación *Zeitschrift für Physik* en 1935 cómo podía ser calculada la energía de enlace, con suposiciones sobre las fuerzas que influyen en los nucleones pero con correcciones para los resultados experimentales. Hans Bethe y R.F. Bacher simplificaron en 1936 la fórmula de Weizsäcker a una expresión que suele llamarse “fórmula semiempírica de masas de Bethe—Weizsäcker”. La misma indica que la energía de enlace es la suma de un número de términos, principalmente un “término de volumen”, proporcional al número másico A.

Luego se encuentran algunos términos negativos de los cuales los más significativos constituían correcciones para que los nucleones en la periferia del núcleo no pudieran interactuar con igual número de nucleones que se encuentran dentro del núcleo, y para que los protones cargados eléctricamente se esfuercen en expandir el núcleo mediante sus fuerzas de repulsión entre sí.

El primero de esos dos términos de corrección también puede verse como el resultado de una tensión superficial equivalente a la existente en una gota de líquido. Esto llevó a que Bohr, junto con *F. Kalkar* publicaran un artículo en 1937 en la publicación danesa *Kgl Danske Videnskab*. Este “modelo de la gota de líquido” tendría importancia cuando Lise Meitner y Otto Frisch interpretaron al año siguiente el resultado inexplicable del químico alemán Otto Hahn, descubriendo así la fisión del núcleo.

Hans Bethe publicó en 1939 en *Physical Review* una propuesta para una serie de reacciones nucleares bastante complicadas, cuyo resultado neto implicaba una fusión de protones en helio. Para posibilitar un balance de cargas eléctricas también deben liberarse las unidades de carga positivas (*positrones*, es decir electrones con carga positiva). En el proceso se incluye como catalizador al carbono 12. Bethe propuso que esta fusión de protones podría ser la que rompiera al desarrollo de energía del Sol. Las reacciones nucleares eran:

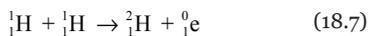


Puesto que muchos términos aparecen en ambos lados, el intercambio neto sería:

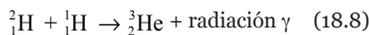


La existencia de los positrones (que se asemejan a los electrones en todos los aspectos, excepto que ellos tienen una carga positiva en lugar de carga elemental eléctrica negativa) fue demostrada por primera vez en 1932 por *Carl D. Anderson* (1905–1991) en el California Institute of Technology en Pasadena, cuando estudiaba fotos de cámara de niebla de reacciones nucleares generadas por radiación cósmica. Eso le valió el premio Nobel de física de 1936. El positrón también ha sido llamado *antielectrón*.

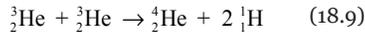
Las reacciones de la energía solar de Hans Bethe ya no se consideran como las causantes del desarrollo de energía del interior del Sol pero sí en estrellas más calientes. Se supone que en el interior del Sol los protones, es decir, los núcleos de hidrógeno, experimentan procesos de fusión. En el primer paso, dos núcleos de hidrógeno forman hidrógeno pesado (*deuterio*) y un positrón de gran energía:



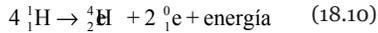
En el próximo paso tiene lugar una fusión del deuterio y el hidrógeno en un isótopo de helio con un neutrón solamente (es decir, helio 3):



Finalmente tiene lugar una fusión de dos núcleos de helio 3 en un núcleo de helio 4 común y dos protones:



El resultado neto de esas reacciones es que el hidrógeno se convierte en helio durante la emisión de energía, entre otras cosas, con positrones



La reacción tiene lugar en el interior del Sol. La radiación original γ de gran energía y la radiación de positrones se convierte, mediante repetidos procesos de absorción y emisión, en radiación electromagnética de mayor onda larga: radiación térmica, radiación ultravioleta y la luz visible que alcanza a la Tierra.

En París la pareja Joliot-Curie continuó con su investigación, alentada por Marie Curie, cuya salud comenzaba a declinar. Ellos se habían perdido el descubrimiento del neutrón, pero los sorprendentes avances en Cambridge los alentaban a realizar nuevos y renovados esfuerzos. Irène había sucedido en el cargo a Marie Curie como jefa del Radioinstituto en 1932.

En 1933 la conferencia Solvay en Bruselas estuvo dedicada, naturalmente, a la física nuclear. Muchos de los físicos más famosos estuvieron allí: Bohr, Chadwick, Fermi, Heisenberg, Irène y Frédéric Joliot-Curie, Pauli y Rutherford, solo para mencionar a algunos de ellos en orden alfabético.

En la Unión Soviética, George Gamow recibió la información de que había sido designado delegado soviético. Gamow se entusiasmó. Soportó muchas cosas en su país e incluso había intentado huir a Occidente. Junto con su esposa *Rho* había intentado remar en el Mar Negro desde Crimea hasta Turquía, donde pensaba hacerle creer a las autoridades de que era danés y que lo enviaban a reunirse con Bohr. Conservaba una licencia de conducir danesa tras su estancia en la casa de Bohr. Pero el mar estaba agitado y la pareja fracasó en su intento. Ahora tenía una nueva posibilidad, pero necesitaba un pasaporte para *Rho*.

Después de gran esfuerzo logró obtener los pasaportes y la pareja Gamow dejó la Unión Soviética para siempre. Ambos viajaron a Bruselas y participaron en la conferencia Solvay. Continuaron luego a EE.UU. donde Gamow fue profesor en la universidad George Washington en la ciudad del mismo nombre.

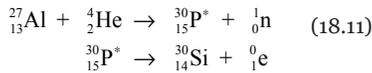
Una de las preguntas que se debatió en la conferencia fue el descubrimiento del positrón. Muchos físicos comenzaron a estudiar sus fotos de cámara de niebla nuevamente. Y así lo hizo también la pareja Joliot-Curie. Comprendieron, para su indignación, que no solo no habían descubierto el neutrón sino tampoco el positrón.

En esa época se pensaba que era posible que el protón fuera en realidad una partícula compuesta por un neutrón y un positrón. La pareja Joliot-Curie informó a la conferencia que habían observado primero un neutrón y luego un positrón, en lugar del esperado protón cuando bombardearon aluminio o boro con partículas α . Eso podría indicar que el protón era una partícula compuesta.

Los otros físicos eran escépticos. Lise Meitner tenía una actitud crítica. Irène y Frédéric regresaron desanimados a París para repetir sus experimentos. Frédéric descubrió que el aluminio que era sometido a las partículas α expulsaba sin duda neutrones y positrones, pero la emisión de positrones continuó también después de que el preparado radiactivo α fuera eli-

minado. Los positrones no provenían de la reacción nuclear. ¡Debían provenir del preparado irradiado como si éste se hubiese convertido en radiactivo!

La pareja Joliot-Curie pensó en lo que había sucedido. Una posibilidad era que la partícula α , que suministraba al átomo de aluminio dos neutrones y dos protones, generara un núcleo inestable que inmediatamente perdía un neutrón. El producto final debía ser en ese caso el fósforo. Si este fósforo era radiactivo y expulsaba un positrón, éste se convertiría luego en silicio. El proceso podría describirse así:



en el que el asterisco marca que el nucleído es inestable y radiactivo. ¿Se había logrado producir un elemento radiactivo artificial por primera vez?

En su novela *The World Set Free* el escritor H.G. Wells predijo en 1914 que se lograrían producir elementos radiactivos artificiales en 1932. Adivinó con un margen de error de tan solo dos años.

No se podía demostrar que las hipótesis eran correctas mediante la experimentación química con silicio (Si), ya que las cantidades resultantes eran muy pequeñas: menores a 10^{-15} gramos, estimaba Frédéric. Sin embargo se podía separar químicamente al fósforo y ver si la radiactividad acompañaba a la fracción de fósforo. La vida media del nucleído (que se suponía era el fósforo 30), era sin embargo de tan solo tres minutos. Había que realizar el análisis químico de manera rápida.

El químico que buscaron para que los ayudara nunca había tenido una exigencia semejante, pero lo logró. El elemento radiactivo era el fósforo. En 1934 la proeza estaba más allá de toda duda. Marie Curie, que estaba muy enferma, pudo vivir la felicidad del descubrimiento de su hija y su yerno. Frédéric describió así su reacción (según Richard Rhodes):

Marie Curie hizo un seguimiento de nuestra investigación y nunca olvidaré la expresión de intensa alegría demostrada cuando Irène y yo le mostramos el primer elemento radiactivo artificial en un pequeño tubo de vidrio. Todavía puedo ver cómo tomaba el tubo de vidrio entre sus dedos (ya quemados por el radio) que contenía el preparado radiactivo, un preparado en el que por ahora la actividad era muy baja. Para confirmar lo que le habíamos contado, tomó un contador Geiger—Müller y pudo escuchar como indicaba el resultado con muchos “clics”. Era, sin dudas, la última gran satisfacción de su vida.

Joliot-Curie informó acerca de su trabajo en *Comptes Rendus* el 15 enero de 1934 y también en una carta enviada a *Nature* cuatro días más tarde. Rutherford les escribió un par de semanas más tarde y los felicitó. Él contaba en su carta que había realizado un experimento semejante sin resultados positivos. Irène y Frédéric habían sido finalmente desagraciados.

Pero Marie Curie estaba muriendo de anemia aplásica, una enfermedad que implicaba la destrucción de las células madre que forman la sangre en la médula ósea. Había estado expuesta a demasiada radiación, primero por su trabajo con radio y luego a los rayos X en el campo de batalla durante la guerra. Su hija Eve escribió así acerca de su madre:

Ella trabaja con una intensidad sorprendente pero también con la imprudencia que la caracteriza. Siempre ha despreciado las medidas de seguridad que tan estrictamente les exige a sus

alumnos, como por ejemplo utilizar pinzas al manipular los tubos con radio, no tocar los tubos de ensayo sin protección y utilizar pantallas de plomo contra la radiación. En el último instante se digna a someterse a los análisis de sangre que por norma se realizan en el Instituto de Radio. Su estado hemático es anormal. ¡Bah! Ha manipulado radio durante treinta años e inhalado emanaciones de ese elemento. Durante los cuatro años que duró la guerra estuvo expuesta a efectos más peligrosos todavía: los rayos X. Un leve cambio de la sangre, quemaduras dolorosas e irritantes en las manos, que a veces se curaban y a veces no. Los riesgos a los que se sometió no pueden ser simplemente calificados como “graves consecuencias”.

El 4 de julio de 1934 Marie Curie falleció en el sanatorio Sancellemoz en Saint-Gervais, al pie del Mont Blanc. Los médicos, en una medida desesperada, la trasladaron allí considerando que la disminución de sus fuerzas podía despertar una vieja tuberculosis. Su médico escribió en su historia clínica:

Madame Pierre Curie ha fallecido en Sancellemoz el 4 julio de 1934.

La causa de la muerte es una perniciosa anemia del tipo aplásico en un período de tiempo breve.

La médula ósea roja no reaccionó, probablemente porque ya había cambiado debido al efecto radiactivo acumulado durante un lapso prolongado.

El descubrimiento del matrimonio Joliot-Curie acerca de la posibilidad de producir elementos radiactivos artificiales tuvo gran importancia práctica. Esos elementos demostraron poder reemplazar al radio en la asistencia médico-sanitaria y tendría gran importancia técnica.

Uno de los que investigaría las posibilidades de uso fue un gran amigo de Bohr, George de Hevesy, que dejó Copenhague en 1926 para ser profesor en Freiburg, pero regresó a Copenhague en 1935, debido a los peligros que entrañaba vivir en Alemania. Hevesy, junto con *Friedrich Paneth* (1887–1958), habían demostrado en 1913 que con la ayuda de los marcadores radiactivos se podía realizar un seguimiento de las reacciones químicas con una proporción mucho menor que la posible con los métodos convencionales. Él y Paneth escribieron en 1923 el libro *Lehrbuch der Radioaktivität* (Libro de texto sobre radiactividad).

19 | Explosiones atómicas por error

A comienzos de la década de 1930 estaba claro que las inmensas cantidades de energía estaban vinculadas a los núcleos atómicos, como si se tratara del genio dentro de la botella. Pero, ¿cómo se abría la botella? ¿Y qué haría el genio? En uno de los viejos cuentos de *Las mil y una noches* el genio no fue misericordioso con el pobre pescador que lo liberó de la botella.

—Tengo una buena noticia para ti, pescador

—¿Cuál?

—¡Pronto morirás y tendrás una muerte horrible!

—Bah, debería avergonzarte, genio: ¡esa es una buena noticia! ¿Por qué quieres matarme si fui yo quien te liberó de la botella y te he salvado de permanecer encerrado en ella para siempre en el fondo del océano?

—Pues bien, te concederé un deseo, dijo el genio. —¡Tú mismo elegirás la manera en que desees morir!

Pero el pescador no quería morir. Engañó al genio y lo devolvió a la botella. Luego se dijo a sí mismo: “Él es un genio pero yo soy un ser humano y Dios me ha dado una inteligencia superior; ¡veamos si con astucia puedo causar su desgracia y superar su perversa falsedad!”

El pescador logró someter al genio y éste le prestó grandes servicios “convirtiéndolo en uno de los hombres más ricos de su época, mientras sus hijas vivieron como princesas hasta su muerte”. No quiero afirmar que el cuento tenga algún valor probatorio, pero su moraleja puede ser un consuelo para los supersticiosos.

Cuando Irène Curie en 1934 logró producir un isótopo radiactivo del fósforo, atrajo la atención de todo el mundo. Al bombardear aluminio con partículas α , creó el fósforo 30. Entre los muchos que se entusiasmaron con este descubrimiento estaba el joven físico italiano Enrico Fermi, que a los 21 años defendió la tesis de su doctorado en la universidad de Pisa y luego estudió en Göttingen y Leiden. En 1927 obtuvo la primera cátedra de física teórica en la universidad de Roma.

Fermi se dio cuenta de que el neutrón recientemente descubierto debía ser un mejor proyectil que las partículas α , si lo que se quería era afectar a los núcleos. Sin carga eléctrica de frenado se podría penetrar fácilmente en los núcleos. Por eso el teórico Fermi decidió dedicarle tiempo a la física experimental.

En la Roma de la década de 1930 no era fácil obtener los recursos para realizar experimentos físico-nucleares. Los físicos experimentales establecidos, conducidos por el profesor *F. Rasetti*, trabajaban con espectroscopía, algo que no ayudaba demasiado. Ni siquiera se podían comprar u obtener prestados los instrumentos más elementales, como el contador Geiger para la medición de radiación. Por ello Fermi debió fabricar sus propios instrumentos. Para colmo Rasetti (que también era un habilidoso fabricante de instrumentos) había partido de vacaciones y no estaba disponible para que le diera los consejos necesarios.

Tampoco alcanzaba con instrumentos de medición: Fermi necesitaba también una fuente de neutrones. Confió en la Providencia, que en este caso no era un concepto teológico sino una criatura de carne y hueso: el profesor *Giulio Cesare Trabacchi* del laboratorio de física del Departamento de Salud Pública. En ciertos aspectos contaba con mejores equipos que los laboratorios de la universidad. Trabacchi mantenía el orden de sus cosas y por eso los físicos jóvenes de la universidad siempre se las pedían. Agradecidos por su actitud, lo llamaban “La Providencia”.

Trabacchi tenía un laboratorio de radón en el sótano. Allí podía acumular el radón en una ampolla de vidrio, que se formaba en un preparado de radio. Después de algunas horas y

durante alguna semana la ampolla de radón tenía a grandes rasgos las mismas propiedades radiactivas que hubiera tenido el preparado de radio si el radón hubiese permanecido en él. El preparado de radio del profesor Trabacchi era de 1 gramo, lo cual significaba que las ampollas de radón eran fuentes de radiación muy fuertes.

Cuando Chadwick descubrió el neutrón, había irradiado berilio con rayos α del polonio. Por eso cabe suponer que Fermi le pedía radón a Trabacchi y que mezclaba los productos hija emisores de radiación α , con polvo de berilio. Así consiguió una fuente de neutrones.

Después Fermi comenzó a bombardear sistemáticamente elemento tras elemento con neutrones. Comenzó con el más liviano, el hidrógeno, y siguió con el litio, el berilio, el boro, el carbono y el nitrógeno, sin obtener resultados interesantes. Ya casi se había rendido cuando intentó con el flúor y logró crear un elemento radiactivo. Empezaba a recibir una retribución por el esfuerzo: los elementos más pesados finalmente daban resultados. Fermi envió un telegrama a Rasetti en Marruecos y le pidió que volviera. Se necesitaban todos los esfuerzos para continuar con los experimentos.

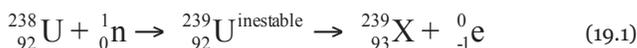
Cada semana se “exprimía” el aparato de radón en el sótano del profesor Trabacchi con el recientemente formado radón, que luego era transferido a tubos de vidrio con polvo de berilio. Fermi tenía la ayuda de un joven colega, *Emilio Segré* (1905–1989), entonces profesor en Palermo. El padre de Segré fue comerciante y Emilio había heredado algo de su visión para los negocios. Tenía el don extraordinario de encontrar un depósito de sustancias que no habían sido estudiadas todavía y regresaba con hallazgos valiosos sin grandes costos para el laboratorio. Algunos metales, como el cesio y el rubidio, se obtenían gratis, ya que eran tan raros que los comerciantes habían abandonado la esperanza de que alguien los pidiera alguna vez. Pero el hombre sabía latín y dejó el polvoriento depósito con la siguiente frase: *Rubidium caesiumque tibi donabo gratis et amore dei*.

Durante la primavera de 1934 Fermi y sus colaboradores habían trabajado con todos los elementos disponibles y finalizaron los experimentos con la irradiación de neutrones al elemento más pesado conocido, el uranio.

Cuando se bombardea un elemento con neutrones se puede esperar que las eventuales reacciones nucleares conviertan algunos átomos en un isótopo del mismo elemento (se suministra un neutrón pero no se cambia la carga nuclear) o en otro elemento que se encuentra cerca del original en cuanto a su número atómico (si el isótopo que se formó es inestable y se degrada rápidamente).

Cuando Fermi irradiaba con neutrones un elemento (por ejemplo, el hierro) se disolvía la muestra en ácido y se agregaban pequeñas cantidades de elementos análogos (por ejemplo, en el caso del hierro: cromo, manganeso y cobalto). Luego se los separaba con métodos químicos convencionales y más tarde se estudiaba si alguna de las fracciones era radiactiva. Si la irradiación del hierro había generado manganeso radiactivo (que fue lo que sucedió) los nuevos átomos de manganeso radiactivo formados acompañaron al manganeso añadido. Después de la separación se podía demostrar que el manganeso, a diferencia del cromo y el cobalto, contenía el elemento radiactivo, y que por ello éste también fuese probablemente manganeso.

Cuando finalmente se irradió el uranio, se descubrió nuevamente que se habían formado elementos radiactivos y que se trataba de más de un elemento. Existía una posibilidad de que ahora, por primera vez, se hubiese creado un nuevo elemento que era más pesado que el uranio, con el número másico 93. Uno se podía imaginar la siguiente reacción nuclear:



Varios años más tarde, en 1940, este supuesto elemento “X” con número atómico 93 sería descubierto y producido por los estadounidenses *Edwin McMillan* (1907—1991) y *Philip Abelson* (es el neptunio), pero en 1934 era algo hipotético y solo se hablaba del “elemento 93”.

La actividad que Fermi podía demostrar ¿provenía del elemento 93? No estaba seguro. El uranio se volvió más radiactivo de lo esperado después de la irradiación. Fermi y su colaborador enviaron un primer informe a la revista *Ricerca Scientifica* en mayo de 1934. No decía que se había descubierto el elemento 93, pero se analizaban señales que indicaban que se trataba de eso.

Desafortunadamente el descubrimiento fue mencionado en un día festivo especial. Fue en una reunión de la academia el 4 de junio, día en el que el rey Víctor Manuel estuvo presente. La atención de la prensa fue grande. Los medios italianos fueron grandilocuentes y publicaron grandes titulares afirmando que el descubrimiento era una prueba de “la victoria cultural del fascismo”.

Fermi, que estaba muy lejos de estar seguro sobre la cuestión, estaba desesperado y vio amenazado su honor científico. Muchos investigadores lo buscaron para darle consejos. La química alemana *Ida Noddack* (1896—1978), que junto con su esposo *Walter* trabajaba en la universidad de Freiburg, le escribió a *Otto Hahn* afirmando que “cuando los nucleídos pesados se bombardean con neutrones, el nucleído en cuestión puede partirse en pedazos que seguramente son isótopos de elementos conocidos”. *Ida Noddack* parecía ser la única que vio que Fermi quizá había realizado la primera fisión nuclear. *Hahn*, temeroso de que *Noddack* destruyera su reputación científica mediante afirmaciones disparatadas, se negó a la publicación de sus opiniones. *Hahn* afirmaba que la idea de que el núcleo de uranio pudiera fisionarse en grandes fragmentos era completamente absurda.

Fermi hizo caso omiso a esa posibilidad. Realizó cálculos teóricos. Apreciaba la energía que según la ley de Einstein se podía obtener del defecto de la masa, y consideraba que era insuficiente para salvar a las fuerzas eléctricas que, según se esperaba, podían mantener unidas a las fracciones del núcleo. Una fisión nuclear era teóricamente imposible, afirmaba él.

Lamentablemente los datos sobre la masa de los núcleos a los que Fermi tenía acceso no eran fiables. No había error alguno en sus cálculos y si hubiera tenido más valores fiables para el defecto de la masa habría descubierto que era posible la fisión nuclear en su experimento. La inesperada actividad que había descubierto en el uranio tenía su razón: él, al igual que *Ida Noddack*, había creído que había dividido el átomo de uranio en más o menos la mitad¹. Si él en lugar de empeñarse en buscar nuevos elementos más pesados que el uranio hubiera hecho análisis químicos de elementos más livianos (como el bario, que es el que se puede esperar después de la fisión nuclear) habría descubierto el fenómeno de la fisión en 1934. ¿Le habría dado una ventaja a las potencias del eje para lograr producir la bomba atómica?

Fermi había dedicado muchos esfuerzos en investigar sistemáticamente el núcleo y finalmente descubrir el elemento 93. Fue decepcionante que tropezara con un descubrimiento mucho más importante y no lo viera.

El esfuerzo no era solo científico: con frecuencia fue también físico. Los investigadores de Roma se veían obligados a realizar proezas al tratar de correr en el menor tiempo posible por los corredores del laboratorio, desde la sala de irradiación hasta el laboratorio químico y la sala de medición, con muestras que contenían elementos radiactivos que desaparecían rápidamente por la desintegración. La esposa de Fermi, *Laura*, cuenta en su libro acerca de Enrico sobre cómo se sorprendían los visitantes. Un respetable señor español preguntó en la planta baja por

<?> Nota del Revisor: Debería decir “él, a diferencia de *Ida Noddack*, no había creído que había dividido el átomo de uranio en más o menos la mitad”.

“Su excelencia, el señor Fermi” y la respuesta fue “¡El Papa está en la planta alta!” El español, que no sabía que el “papa” era el pseudónimo de Fermi, subió desconcertado la escalera y estuvo a punto de tropezar con un hombre que corría, vestido con un sucio guardapolvo de laboratorio. Al volver a preguntar por la sala de trabajo de “Su Excelencia Fermi”, el visitante fue introducido en el corredor y en su corrida pudo ver estupefacto que el hombre del laboratorio que estaba agitado era Su Excelencia misma. El español tuvo que conformarse con una conversación confusa frente a un aparato de medición, mientras Fermi anotaba cifras con entusiasmo.

El experimento con reacciones nucleares mediante irradiación continuó. La pareja Joliot-Curie estaba muy ocupada después de producir un nuevo elemento radiactivo. En el Instituto Kaiser-Wilhelm de química en Berlín-Dahlem los investigadores también estaban impacientes. Otto Hahn y Lise Meitner tenían en 1934 un nuevo colaborador veintitrés años más joven: el químico *Fritz Strassmann* (1902–1980). Juntos comenzaron a trabajar para investigar los posibles elementos más pesados que el uranio (“transuránicos”) que Fermi buscaba tan intensamente. Durante 4 años y hasta 1938, el grupo trabajó mucho y creyó haber encontrado una serie de elementos pesados nuevos. Los representaban con el prefijo “eka” (del sánscrito “el primero”) seguido del nombre del elemento conocido que más cerca se encontraba en el sistema periódico. Cuando se creyó haber descubierto el ekarenio²² y el ekaosmio fue porque se trataba de elementos con los números atómicos 93 y 94, es decir los elementos que actualmente llamamos neptunio y plutonio.

Esos descubrimientos habrían comprobado el dudoso descubrimiento de Fermi del “elemento 93” si no hubiera sido por algunas extrañas e inexplicables contradicciones en la explicación de cómo pudieron haber aparecido los nuevos elementos. El neptunio y el plutonio todavía no habían sido definitivamente descubiertos, a pesar de todo.

En 1938 llegaron informes contradictorios desde París. La pareja Joliot-Curie informó que ellos, luego de haber irradiado uranio con neutrones, habían encontrado un elemento radiactivo con un período de semidesintegración de tres horas y treinta minutos. Creían que se trataba de un isótopo de torio. Esto solo podía explicarse si el átomo de uranio, después de haber sido impactado por un neutrón, se había convertido en inestable y decaído durante la emisión de una partícula α .

Esto irritó a Lise Meitner. Ella se había imaginado en 1934 la posibilidad de que el torio se podría formar en una reacción de esas características, pero Strassmann le había asegurado a ella, después de repetidos experimentos, que no había torio en el uranio irradiado. ¿Se había equivocado Strassmann? A solicitud de Meitner repitió los experimentos y pudo dar una respuesta. Los investigadores franceses se habían equivocado.

En lugar de publicar esos resultados y desacreditar al grupo investigador francés, Meitner y Hahn escribieron una carta a París con una advertencia en caso de seguir afirmando el hallazgo de torio. Irène Curie retiró su hipótesis y describió al nuevo elemento de 3,5 horas con las siguientes palabras: “El resultado del análisis dice que el elemento de 3,5 horas tiene las mismas propiedades que el lantano, del cual por ahora parece imposible separar por otros medios que no sea el fraccionamiento.”

La idea de que el nuevo elemento podría ser lantano era tan absurda que ni siquiera se discutía. Un núcleo tan liviano como el lantano, tan solo la mitad de pesado que el uranio, no podía producirse mediante desintegración radiactiva después de un bombardeo de neutrones. El nuevo elemento debería ser un elemento transuránico con las mismas propiedades químicas que el lantano y así se cayó en la misma trampa en la que había caído Fermi anteriormente, en sus esfuerzos por encontrar el “elemento 93”. Ida Noddack, que había señalado la verdad, lo había descartado de una vez y para siempre por demasiado fantasioso.

2 Nota del Revisor: Debe leerse “ekarenio”.

Ahora los investigadores de Europa se enfrentaban al avance de Hitler. En marzo de 1938 los alemanes cruzaron la frontera con Austria, y el 16 de abril se aprobó la anexión a Alemania, la "Anschluss", con el 99,75% de los votos. De esa manera el pasaporte austríaco de Lise Meitner dejó de protegerla y al ser judía corría grandes riesgos en el país nazi. En julio de 1938 huyó a Estocolmo, donde fue recibida por Manne Siegbahn en el Instituto Nobel de física. El Instituto Kaiser-Wilhelm de química perdía así a su principal físico.

Cuando Hahn y Strassmann leyeron el informe de Irène Joliot-Curie sobre un elemento transuránico con las mismas propiedades que el lantano, realizaron rápidamente una serie de experimentos. Encontraron que después de añadir bario a la "solución de oxígeno" del uranio irradiado con neutrones se precipitaban por lo menos tres elementos radiactivos nuevos con las mismas propiedades que el bario. Después pudieron demostrar que esos elementos se desintegraban en productos hija que se podían precipitar con lantano. Los investigadores de París tenían razón: existían elementos semejantes al lantano. Era posible que los elementos semejantes al bario fueran isótopos del radio y los elementos semejantes al lantano, isótopos del actinio. Ni Hahn ni Strassmann concebían que los elementos fueran simplemente isótopos de bario y lantano. Al igual que Irène Joliot-Curie consideraban que eso era algo disparatado.

Pero también la idea de que el uranio se pudiera desintegrar en radio y actinio era algo rebuscado para los físicos que en el otoño de 1938 leyeron los resultados de Hahn y Strassmann. Durante una visita a Copenhague, Hahn debatió su teoría con Niels Bohr, que inmediatamente dijo que la idea era disparatada y que los nuevos elementos debían ser transuránicos. Lise Meitner dijo en su carta que sus anteriores colegas eran buenos químicos, pero que sus especulaciones eran tonterías.

Emilio Segré llegó a Nueva York en el verano de 1938 con la intención de continuar viaje a California como investigador visitante en Berkeley durante algunos meses. Después de haber leído acerca de la campaña antisemita de Mussolini, decidió establecerse en los Estados Unidos. Fermi había pasado un verano en la universidad de Michigan en la ciudad de Ann Arbor en 1935 y quedó impresionado por los recursos tecnológicos en los EE.UU. y el clima político más liberal. No tenía nada en contra de establecerse, pero su esposa Laura no quería dejar Italia. Al año siguiente Fermi dio una conferencia en una escuela de verano en la Universidad de Columbia de Nueva York. El verano comenzó con la guerra civil española, en la que Franco recibiría el apoyo de Hitler y Mussolini. En Roma los investigadores fascistas tenían cada vez más poder sobre la investigación. La familia Fermi comenzó a preocuparse, pero Fermi regresó.

La situación en Italia se volvía cada día más peligrosa y en 1938 apareció el manifiesto antisemita que Segré había leído. Los italianos eran arios, decía el texto, pero los judíos "no pertenecen a la raza aria". La esposa de Fermi era judía. Fermi comenzó en secreto a analizar la posibilidad de obtener un empleo en alguna universidad estadounidense y obtuvo la promesa de una cátedra en la universidad de Columbia.

En una visita a Bohr, Fermi escuchó que estaba propuesto para el premio Nobel de física. Bohr contó que se esperaba que el ganador del premio viajara a Estocolmo junto con su familia. Esta era la oportunidad para huir de Italia.

La situación empeoraba rápidamente. El 7 de noviembre de 1938 el diplomático alemán *Ernst vom Rath* fue asesinado en París por una estudiante judía que quería vengarse de las injusticias cometidas contra sus padres en Polonia. El hecho fue tomado como pretexto por el ministro de propaganda Goebbels para llevar adelante represalias contra los judíos en Alemania durante la noche del 9 al 10 de noviembre: "La noche de los cristales". Unas cuarenta personas fueron asesinadas y otras miles encarceladas y enviadas a los campos de concentración.

En la mañana del 10 de noviembre, Fermi escuchó en las noticias de la radio el eco de estos sucesos en Italia. Los maestros judíos fueron despedidos. Los niños judíos no podrían asistir más a escuelas comunes. Los médicos y abogados judíos solo podrían ayudar a otros judíos. Los “arios” no pudieron trabajar más con judíos. Se despojó a los judíos de sus derechos ciudadanos y de sus pasaportes. Fue entonces que Fermi recibió la información oficial desde Estocolmo donde se le anunciaba que recibiría el premio Nobel de física de 1938 por “los nuevos elementos radiactivos, producidos mediante la irradiación de neutrones, y relacionado con todo ello, su descubrimiento de las reacciones nucleares generadas por neutrones lentos.” La familia Fermi dejó Italia a último minuto para viajar a Estocolmo y estar presente en la ceremonia de entrega. Dejaron todos sus bienes. No se atrevieron a vender nada para no despertar sospechas. El premio Nobel sería el dinero del viaje a Nueva York y a la libertad.

En el Instituto Kaiser-Wilhel de química en Dahlem, Hahn y Strassmann realizaron nuevos intentos para identificar al místico elemento de las 3,5 horas. Esta vez, después de la precipitación con bario, realizaron una separación química del radio para demostrar que el elemento burlón era un radioisótopo. Para su sorpresa, no encontraron ninguna actividad en la fracción donde debería haber radio. Entonces hicieron la separación después de añadir una conocida cantidad de radio (^{224}Ra). El método demostró ser irreprochable: se encontró el radio añadido en la fracción correcta.

Evidentemente los físicos tenían razón: el elemento de 3,5 horas no era un radioisótopo. Hahn y Strassmann realizaron análisis más complicados. Finalmente se convencieron. Por más esfuerzo que hicieran para separar el nuevo elemento del bario y su producto hija del lantano, resultaba imposible hacerlo. Había solo una conclusión, por más disparatada que pareciera: Los místicos elementos debían ser simplemente bario y lantano.

A las 23 horas del 19 de diciembre Otto Hahn escribió finalmente una carta a su vieja colaboradora Lise Meitner. ¿Cómo poder explicar que el “radio”-isótopo parecía ser bario? “La cuestión es así: Hay algo místico con los “radioisótopos”, algo que todavía no queremos contarle a nadie excepto a ti. [...] Nuestros isótopos de Ra se comportan como Ba.” Él continuó llorando:

Quizá puedas proponer alguna explicación fantástica. Comprendemos que /el uranio/ realmente no puede estallar y ser bario. [...] Intenta pensar alguna otra posibilidad. ¿Isótopos de bario con peso atómico mucho mayor que 137? Si se te ocurre algo que pueda ser publicable, volveremos a ser tres en esta tarea. No creemos que esto sean tonterías o que las contaminaciones nos hicieran una jugarreta.”

La carta llegó a Lise Meitner que estaba en Estocolmo el miércoles 21 de diciembre. Meitner, que se sentía sola y aislada en Suecia, se preparaba para viajar a Kungälv para festejar las navidades en casa de una amiga, *Eva von Bahr-Bergius*, junto con su sobrino Otto Frisch. Frisch, que también era físico nuclear, venía de visitar el laboratorio de Niels Bohr en Copenhague, donde trabajó ocasionalmente. Lise Meitner respondió inmediatamente a la carta de Hahn:

Sus resultados sobre el radio son muy sorprendentes. ¡Un proceso que trabaja con neutrones lentos y que tiene como resultado el bario! [...] Por ahora me resulta difícil aceptar la hipótesis de tan amplia desintegración, pero hemos vivido tantas sorpresas en la física nuclear que no se puede afirmar que algo “es imposible” sin dudarlo.

Meitner contaba en su carta que estaba camino a Kungälv y le pidió que las próximas cartas se las enviara allí. Ella pensaba viajar a Kungälv el viernes 23 de diciembre, el día anterior a la Nochebuena. El lunes, el día siguiente al que Hahn le había escrito a Lise Meitner, éste y Strassmann intentaron escribir un informe sobre sus observaciones y le habían pedido a *Paul Rosbaud*, redactor de la editorial Springer Verlag, que le guardara un espacio en la publicación *Naturwissenschaften*. Rosbaud comprendió que se trataba de algo importante y prometió eliminar de la publicación una tesis menos urgente. Pero debía contar con el manuscrito a más tardar el viernes de esa semana.

Hahn y Strassmann continuaron con sus análisis y pudieron demostrar que el elemento se comportaba como si el lantano fuera un producto hija de la desintegración del elemento que se comportaba como el bario. A pesar de ser increíble, debe haberse formado bario luego de la irradiación del uranio con neutrones. Pero los químicos no se atrevían a afirmar algo que los físicos nucleares podían demostrar que era imposible. Ellos esperaban una nueva carta de Meitner que le diera una explicación física a su tesis, pero esa carta no llegó. Lise Meitner quería esperar a discutir el problema con su sobrino antes de afirmar nada.

Hahn le escribió nuevamente a Lise Meitner el miércoles 21 de diciembre, cuando ya estaba el resultado del lantano a mano, pero todavía no había recibido la carta donde ella le pedía que enviara sus consultas a Kungälv. Por eso él le envió la carta a la dirección en Estocolmo.

No podemos seguir con los resultados aún cuando parezcan absurdos en términos físicos.
Habrás realizado una buena acción si puedes encontrar una (explicación) alternativa. Cuando estemos listos mañana o pasado mañana te enviaré una copia del manuscrito.

El día anterior a la Nochebuena de 1938 Meitner viajó a Kungälv, mientras la fecha de cierre de la publicación estaba próxima. Pero Meitner no lo sabía: todavía no había recibido la segunda carta de Hahn. Hahn y Strassmann habían escrito mientras tanto un informe, pero tenían problemas con la formulación del texto. ¿Seguirían hablando del “radio” o cambiarían “radio” por “bario”? Evitaron dar una respuesta utilizando en su lugar la expresión “metales alcalino-térreos”, un término que podía incluir a cualquier elemento. Se expresaron con sumo cuidado porque no contaban con la opinión de Meitner:

Extraemos la conclusión de que nuestros “radioisótopos” tienen las propiedades del bario. Como químicos deberíamos decir que los nuevos productos no son radio sino bario. No pueden ser otros elementos que no sean el radio y el bario.

Continuaron afirmando con precaución:

Como químicos deberíamos revisar el esquema de desintegración que antecede y colocar los símbolos Ba, La, Ce en lugar de Ra, Ac, Th. Pero como “químicos nucleares” que trabajamos muy cerca de la física, no somos capaces de dar un paso tan drástico en contra de todas las leyes anteriores de la física nuclear³. Podría tratarse de una serie de coincidencias inusuales que nos hayan dado indicaciones falsas.

Hahn envió el manuscrito por correo el jueves 22 de diciembre con copia a Lise Meitner,

³ Las últimas cinco palabras en esta oración (en sueco) fueron cambiadas por Hahn en la corrección por “toda la experiencia anterior”.

nuevamente a su dirección en Estocolmo. Pero el viernes Meitner llegaba a Kungälv y se alojó en la pensión de la calle Västra. El tren del sobrino Otto Frisch llegó muy tarde esa noche, procedente de Copenhague. Frisch estaba preocupado porque su padre estaba en el campo de concentración de Dachau, después de la Noche de los Cristales. Otto llevaba consigo un par de esquís y estaba decidido a utilizarlos.

Mientras tanto Meitner estaba entusiasmada por debatir las observaciones de los químicos alemanes y su significado, tan pronto como ambos tuvieran la posibilidad de conversar durante el desayuno el día siguiente, en la Nochebuena. Frisch, sin embargo, estaba interesado en hablar acerca de un gran electroimán que pensaba construir para sus experimentos en Copenhague. La tía le mostró entonces la carta de Hahn del 19 de diciembre.

“Bario”, dijo Frisch, “no lo creo. Tiene que ser un error.”

Pero Lise Meitner insistió. “Si Hahn, con toda su experiencia como radioquímico dice eso, por algo debe ser.”

El sobrino comenzó poco a poco a interesarse y comenzaron a discutir el problema. ¿Una fisión nuclear? Primero parecía imposible. La energía no alcanzaría. Otto Frisch describiría después su primera reacción:

Pero ¿cómo podía el bario formarse a partir del uranio? Nunca ningún fragmento mayor que los protones o núcleos de helio (partículas alfa) se habían separado de los núcleos y la idea de que un gran número de ellos pudieran separarse podía descartarse. No había suficiente energía. Tampoco era posible que el átomo de uranio se pudiera haber dividido. Un núcleo atómico no es un cuerpo frágil que se pueda desintegrar o romper. Bohr había dicho que el núcleo era más parecido a una gota de líquido.

Esto último les daba una idea. Ellos se aferraron al “modelo de la gota de líquido” del núcleo atómico que Bohr había propuesto en 1937 en base a los cálculos de Bethe—Weizsäcker de la energía de enlace y a las observaciones que indicaban que el término de corrección para los nucleones externos sugería la semejanza con la tensión superficial en una gota de líquido, mientras que otro término corregía el efecto repulsivo de las fuerzas coulombianas.

Si un núcleo atómico suministra energía, razonaban, y la energía se divide en los nucleones y causa perturbaciones, se puede pensar que los nucleones experimentan oscilaciones de tal modo que el núcleo, al igual que una gota de líquido en algún momento se extenderá. La así llamada “fuerza fuerte” que mantiene juntos a los nucleones actúa solo a muy corta distancia. Una extensión del núcleo dará una prioridad momentánea a la repulsión recíproca de los protones mediante las fuerzas eléctricas de coulomb. La “tensión superficial”, que se genera mediante el efecto de fuerza desigual sobre los nucleones más exteriores, quiere restaurar en “la gota” una forma esférica, pero si la gota está demasiado alargada, esto implica que las mitades más alejadas se separen, de manera semejante a una gota de líquido que se divide en dos partes.

Si bien el modelo de la gota de líquido es primitivo para los físicos nucleares de la actualidad, le permitió a Meitner y Frisch aceptar la posibilidad de la fisión nuclear. Frisch dijo: “Recuerdo que pensé inmediatamente en el hecho de que las cargas eléctricas disminuyen la tensión superficial.” Y en sus memorias describió lo siguiente:

Y comencé inmediatamente a calcular cuánta tensión superficial podría disminuir en un núcleo atómico. No sé de dónde obtuve todos nuestros números pero creo que debo haber tenido una vaga idea acerca de las energías de enlace y pude hacer una estimación de la

tensión superficial. Por supuesto que conocíamos bien la carga y el tamaño. Y en lo referente a la magnitud, el resultado era una carga (es decir, un número atómico) de aproximadamente 100, la tensión superficial del núcleo desaparecería y por eso el uranio 92 debería estar bastante cerca de la inestabilidad.

Lo que Frisch quería decir era, en otras palabras, que las fuerzas de coulomb que tienden a rechazar a los protones (de igual carga) se harían cargo de las fuerzas centrípetas si hubiera más de 100 protones en el núcleo, es decir, en caso de que el número atómico sea mayor que 100.

Hay muchos relatos acerca de cómo se convencieron Lise Meitner y su sobrino de que Hahn y Strassman habían provocado una fisión nuclear. Otto Frisch quería utilizar sus esquís y Lise Meitner, a quien le gustaba realizar largos paseos, lo siguió a pie. Se sentaron sobre algunos troncos caídos, dibujaron e hicieron cálculos. Con ayuda de sus conocimientos acerca del tamaño del defecto de la masa pudieron estimar la energía que se liberaría en una fisión nuclear como esa y arribaron a un resultado: aproximadamente 200 millones de electronvoltios. Veían esa información sobre esta enorme cantidad de energía (no en medidas absolutas sino relativas a una única fisión nuclear) como parte de un rompecabezas de un problema físico. Probablemente no comprendieron la posibilidad de una reacción en cadena y la extracción de energía nuclear a gran escala.

Ni la carta de Hahn del 21 de diciembre, con la información de que se había encontrado algo que parecía ser lantano como producto hija del bario, ni la copia manuscrita que se había enviado por correo a Estocolmo el 22 de diciembre, habían llegado a Kungälv antes del feriado de Navidad. Sin embargo Hahn había recibido la primera carta de Lise Meitner con la información de que pasaría la Navidad allí. Él estaba muy ansioso por conocer la opinión de ella y su apoyo. El miércoles 28 de diciembre volvió a escribirle y esta vez a la dirección correcta. Él le suplicaba: “Estoy muy interesado en conocer tu sincera opinión. Quizá tú puedas calcular y publicar algo.” La carta llegó a destino el jueves, y Meitner la contestó el mismo día. Le dijo que consideraba el hallazgo del bario como “muy interesante. Otto Robert y yo hemos pensado mucho acerca de esta cuestión”, pero ella no le dio ninguna explicación.

Un día más tarde llegó el correo con las cartas anteriores y el manuscrito desde Estocolmo. El primer día de enero de 1939 Meitner le envió sus saludos de Año Nuevo. Fue muy cuidadosa al hablar de la fisión nuclear: “Hemos leído su trabajo detalladamente y consideramos que *quizá* es posible desde el punto de vista de la energía que un núcleo tan pesado se rompa.” Siguió quejándose de que sus anteriores malentendidos no la ayudaban en sus nuevos comienzos en el exilio. Frisch agregó: “si sus hallazgos son realmente correctos, serían motivo de muchísimo interés y tengo mucha curiosidad por ver más resultados.”

Los dos físicos omitieron darle a Hahn la información que buscaba, algo de lo cual ellos deben haber sido conscientes, y que resulta difícil de comprender. ¿Era tan increíble la respuesta que no se atrevían a creer en sus propias conclusiones o querían ser los únicos que extrajeran esas conclusiones? ¿Querían el apoyo de Bohr antes de atreverse a estar seguros?

Frisch y Meitner dejaron Kungälv el día de Año Nuevo de 1939. Él se fue a Copenhague, y ella a Estocolmo. El 3 de enero Frisch conoció al profesor Bohr y comenzó a contarle. Antes de que finalizara, Bohr se golpeó la frente y gritó: “¡Oh, qué idiotas hemos sido! ¡Oh, pero esto es maravilloso! ¡Podríamos haberlo previsto todo! ¡Es exactamente como debe ser!”

De regreso en Estocolmo Lise Meitner encontró las correcciones de Hahn. Su inseguridad había desaparecido y le escribió a Hahn: “Ahora estoy completamente *segura* de que ustedes

realmente han desintegrado el bario⁴⁾ y creo que es un maravilloso resultado, razón por la cual los felicito calurosamente a ambos. [...] Tienen un extenso, y hermoso campo de trabajo frente a ustedes. Y créeme: a pesar de que en este momento tengo las manos vacías, estoy feliz por lo maravilloso que esos descubrimientos significan.”

Frisch analizó un informe junto con su tía durante un llamado telefónico a Estocolmo. También quería analizar el informe con Bohr, pero no había tiempo ya que Bohr estaba por viajar a los Estados Unidos durante tres meses, donde entre otras cosas se reuniría con Einstein en Princeton. Frisch apenas alcanzó a escribir un par de páginas para llegar a tiempo a Hovedbanaarden, donde Bohr tomaría el tren a Gotemburgo y luego el barco a EE.UU. Ellos contaban con que Frisch enviara inmediatamente el artículo a *Nature*, y Bohr prometió no contar nada a sus colegas estadounidenses antes de que la nota fuera publicada.

El informe de Hahn y Strassmann se publicó en *Naturwissenschaften* el 6 enero de 1939 y Frisch lo tuvo en sus manos al día siguiente. Discutió el problema con *George Placzek*, un físico teórico checo de lengua muy afilada que trabajaba con Bohr. Placzek era muy escéptico y consideraba que Frisch necesitaba más pruebas. ¿Podía conseguir fotografías de una cámara de niebla de los productos de fisión de elevada energía? Frisch no creía que una cámara de niebla era adecuada para este propósito y que sería más sencilla una medición de los pulsos de corriente en una cámara de ionización. No se esperaba que los productos de fisión pesados con número másico entre 80 y 150 tuvieran mayor alcance en el aire que algunos milímetros, pero ellos generarían una ionización muy fuerte. Frisch contaba con que ellos soltarían aproximadamente 3 millones de electrones de las moléculas de aire generando así pulsos muy fuertes.

Frisch puso en condiciones una cámara de ionización compuesta por dos placas de metal separadas entre sí con la ayuda de un anillo de vidrio aislante de 1 centímetro de altura. Se cargó una placa y se la conectó a un amplificador y a un osciloscopio, de tal modo que los pulsos de corriente pudieran ser observados en un monitor. Luego colocó una fuente de neutrones y uranio en la cámara de ionización y comenzó su experimento la tarde del viernes 13 de enero. Continuó toda la noche y encontró lo que deseaba: pulsos de corriente suficientemente fuertes.

Cansado y feliz, constató al día siguiente que el viernes 13 había sido un día de suerte. Más feliz estuvo al día siguiente cuando recibió un telegrama donde le comunicaban que su padre había sido liberado del campo de concentración y que tanto él como su madre estaban camino a Estocolmo para compartir un departamento con su tía.

Con de Hevesy trabajaba un joven biólogo estadounidense, *William Arnold*, que seguía con interés los experimentos de Frisch cuando éste los repetía con orgullo y se los mostraba a todos los interesados. Arnold contó cómo se comenzó a utilizar la palabra “fisión”:

Ese mismo día, más tarde, Frisch me buscó y me dijo “Tú trabajas en un laboratorio de microbiología. ¿Cómo llamas al proceso en el que la bacteria se divide en dos?” Y yo respondí: “Fisión binaria” El quería saber si se podía llamar solamente “fisión” y le dije que sí, que se podía.

En los dos trabajos que Frisch envió a *Nature* en la tarde del lunes 16 enero de 1939, al hablar de la fisión nuclear se utilizó por primera vez la palabra “fisión”. La primera publicación, redactada junto con la tía Lise, llevaba por título “Desintegración del uranio mediante neutrones: un nuevo tipo de reacción nuclear”. En la otra publicación, describió sus propias pruebas físicas de la fisión nuclear.

4 Nota del Revisor: El elemento desintegrado era el uranio y no el bario.

Bohr viajó a los Estados Unidos en el barco *Drottningholm* de la Línea Naviera Svenska Amerika y lo acompañó su hijo Erik y el colega *Leon Rosenfeld* (1904–1974). A pesar de los mareos tuvieron intensos debates acerca del significado del inesperado descubrimiento en Berlín y la explicación física que Lise Meitner y Otto Frisch habían dado. El *Drottningholm* llegó a Nueva York el 16 enero, el mismo día en que Frisch había enviado por correo las dos publicaciones. En el muelle de la calle 57 esperaba el matrimonio Fermi, que recientemente había llegado a EE.UU., tras la entrega del premio Nobel en Estocolmo, y *John Wheeler*, un joven físico que había trabajado con Bohr en el invierno de 1934–1935 y que ahora trabajaría con él en Princeton.⁵ Bohr pasó la noche en Nueva York y partió con los Fermi, mientras que Rosenfeld acompañó a Wheeler a Princeton. Bohr no había pensado en exigirle confidencialidad a Rosenfeld y éste estaba ansioso por contar acerca del fantástico descubrimiento. Por eso Wheeler recibió un informe completo sobre la cuestión en el tren a Princeton.

Todos los lunes por la tarde se organizaban en Princeton encuentros del “club de la revista”, en la que los físicos discutían conjuntamente las noticias y los informes. Era Wheeler quien se ocupaba circunstancialmente de este “club”, una reunión con muchos asistentes. Wheeler le pidió a Rosenfeld que contara algo acerca de Hahn, Strassmann, Frisch y Meitner. Había tantas personas que los últimos en llegar debieron escuchar parados.

Era la primera vez que del otro lado del Atlántico se conocía la noticia acerca de “uranium splitting” (la palabra “fisión” fue aceptada por Frisch recién después de que Bohr y Rosenfeld partieran de Europa). Rosenfeld recordó así ese encuentro: “el efecto que tuvo mi charla sobre los físicos estadounidenses fue más espectacular que la fisión nuclear misma. Todos salieron corriendo a difundir la noticia en todas direcciones.”

Sin embargo Bohr había mantenido su promesa y no le había contado nada a Fermi, que recién conoció la noticia cuando *Isidor Isaac Rabi* (1898–1988), profesor de física en la universidad de Columbia de Nueva York, regresó allí procedente de Princeton. Recién ahora comenzaba Fermi a comprender lo que en realidad había observado cuando creyó estar viendo el “elemento 93” en Roma, en 1934.

Cuando Bohr arribó a Princeton el lunes, fue recibido con gran revuelo: la noticia que él había guardado para sí mismo era de conocimiento público. Bohr se sintió muy incómodo. Esa misma tarde le escribió a su esposa en Copenhague: “Tuve miedo, porque le había prometido a Frisch que iba a esperar hasta que el informe de Hahn se publicara y que el suyo propio fuera enviado.”

Durante la travesía en barco, Bohr y Rosenfeld hicieron algunas anotaciones. Bohr tardó tres días en escribir una carta a *Nature*, en la cual le otorga el mérito de la explicación física a Meitner y Frisch. Ellos lo necesitaban, pensó, para poder establecerse nuevamente en el exilio.

El 25 de enero Bohr llegó a Washington para participar en una conferencia el día siguiente. La conferencia fue la quinta de una serie que había comenzado con George Gamow, después de que él junto con su esposa Rho arribaran en 1933, procedentes de Bélgica. Para la conferencia de Washington de 1939 contó con la ayuda de Edward Teller, el dinámico físico húngaro que jugaría un gran papel en el desarrollo futuro. Tan pronto como Bohr arribó a Washington, llamó a Gamow y le contó la emocionante historia de la fisión nuclear. Gamow, a su vez, llamó por teléfono a Teller y le dijo: “Bohr ha llegado a la ciudad. Se volvió loco. Dice que un neutrón puede dividir al uranio.”

Al día siguiente, el 26 enero de 1939, se abrió la conferencia. La fotografía de 51 asistentes

5 Princeton se encuentra en Nueva Jersey, a mitad de camino entre Nueva York y Filadelfia, a una distancia de Manhattan equivalente a la existente entre Estocolmo y Uppsala.

muestra a físicos famosos, tales como Bethe, Bohr, Fermi, Gamow, Rabi y Teller. Bohr se sentía ahora liberado de su promesa: El informe de Hahn y Strassman había sido publicado y Bohr sabía ahora que los artículos de Frisch y Meitner estaban en camino. La conferencia fue inaugurada por Gamow, que a su vez presentó a Bohr. Uno de los asistentes contó lo siguiente: “Bohr comenzó dando a conocer su noticia acerca de los experimentos de Hahn y Strassmann. [...] También contó acerca de la interpretación de Meitner: el uranio había sido dividido. Como siempre, hablaba de manera incoherente, por lo que no había mucho contenido en su relato excepto los hechos. Luego tomó la palabra Fermi, y dio su habitual presentación elegante, incluyendo todas las conclusiones posibles.”

La noticia se había dado a conocer.

Durante 1939 los periódicos escribieron libremente acerca del descubrimiento que habían realizado Hahn y Strassman. Pronto se comprendió que esto constituía el primer paso hacia la extracción de la “energía atómica” y quizá también hacia las “armas atómicas”. Todavía no se hablaba de “energía nuclear” o “armas nucleares” sino que se utilizaba un término algo desorientador: “atómico”, a pesar de que también puede decirse que las reacciones químicas comunes convierten la energía atómica (pero no la energía nuclear).

La revista *Time* publicó el 6 de febrero de 1939 lo siguiente:

Gran accidente: Hace algunas semanas el Dr. Otto Hahn del Instituto Kaiser Wilhelm de Berlín se puso su ropa de trabajo y luego ingresó en su laboratorio para realizar un experimento físico. Con un rayo de neutrones bombardeó un trozo de uranio. Mientras este pequeño experimento rutinario tenía lugar, todo estaba en calma en el laboratorio.

Pero cuando Hahn examinó sus productos finales y se sentó con lápiz y papel a calcular lo que había sucedido, llegó a la conclusión de que había generado la explosión atómica más violenta que jamás haya sido causada por el hombre. Y lo que es más: no había tenido la intención de generarla. Fue un gran accidente.⁶

No hubo violencia visible o audible, ya que la cantidad total de energía liberada no era suficiente para aplastar a una mosca contra la pared, y a pesar de que el descubrimiento no despertó esperanzas de impulsar un buque oceánico durante miles de millas náuticas con la energía atómica que está atrapada en un vaso de agua, esto ayuda a confirmar las afirmaciones de los físicos respecto de que estas cosas podrían ser posibles si se pudiera liberar energía atómica de una manera efectiva.

El 13 de marzo de 1939 se publicó lo siguiente en la revista *Time*:

La noticia relacionada con la inesperada explosión atómica del Dr. Otto Hahn llegó a los físicos del mundo con una velocidad meteórica. Porque con ella llegó la noticia de que entre los productos finales del experimento parece existir alguna forma de bario.

Este bario fue la pista hacia algo sin precedentes. Pues el enorme átomo de uranio, el más pesado de los 92 elementos, pesa 238 unidades. El átomo de bario pesa 137 unidades. Debido a que el bario solo se puede imaginar surgiendo de un gran átomo de uranio, era lógico suponer que éste se había partido en dos partes casi iguales.

Anteriormente no se habían logrado fragmentos de átomos pesados; esta fue la primera vez que han sido partidos en la mitad.

⁶ Se trata de un juego de palabras, ya que “accident” en inglés puede significar “accidente” o “accidental”, en el sentido de algo fortuito.

El descubrimiento ya nos ha dado nuevas palabras. La partición del núcleo de uranio es descrita como una “fisión”, lo cual en biología significa una división de un organismo en dos o más partes. La semana pasada la “fisión” del átomo de uranio parecía constituir un descubrimiento que podría ganar el premio Nobel. Pero las leyes alemanas actuales prohíben a los alemanes recibir el premio Nobel. Ahora los físicos han entregado esta distinción de manera no oficial a Lise Meitner en Estocolmo (una física) y también a la ganadora del premio Nobel Irène Joliot-Curie (hija de Marie y Pierre Curie) en París, quien realizó el trabajo que facilitó a Hahn la posibilidad de identificar un elemento tan importante como el bario en sus productos bombardeados.

Quizá resulte interesante leer lo que los periódicos suecos publicaron a comienzos de 1939. El *Folkets Dagblad* publicó el 24 de febrero:

EXPLOSIÓN ATÓMICA HISTÓRICA EN COPENHAGUE

La radiación de radio convierte al uranio en bario

“En la fisión se midió una energía de 200 millones de voltios

Según el periódico Berlingske Tidende, el investigador austriaco Dr. Robert Frisch, invitado por el profesor Niels Bohr para trabajar en dicho instituto, ha confirmado un descubrimiento histórico de los científicos alemanes Hahn y Strassmann. El profesor Bohr trabaja en el instituto de la universidad de física teórica, y su comprobación demuestra que la irradiación del uranio genera bario.

El resultado de los científicos alemanes fue dado a conocer por el Dr. Frisch a través de la profesora Meitner de Estocolmo, con la cual él ha trabajado todo el tiempo. El Dr. Frisch utilizó 600 miligramos de radio que Bohr recibió como regalo al cumplir 50 años y constató no solo la inusual transformación del uranio en bario sino también que en esta división del núcleo se generó una energía de no menos de 200 millones de voltios, la mayor energía medida en la Tierra, solo superada por las fuentes de fuerzas cósmicas.⁷

El descubrimiento ha sido muy debatido en Estados Unidos en los últimos días, país donde se encuentra actualmente el profesor Bohr. Según un telegrama, el profesor habría dicho que en realidad debió haber previsto el descubrimiento, ya que en cierta forma es una consecuencia lógica de su teoría nuclear.

El 17 de febrero el conocido oceanógrafo y físico *Hans Pettersson* (1888—1966) de Gotemburgo extrajo las siguientes conclusiones en un artículo publicado con el título “La transformación del núcleo del uranio” en el periódico *Göteborgs Handelstidning*:

Se puede comprender el hecho de que Hahn y Strassmann hayan presentado con la mayor precaución esos resultados inesperados. Haber sido capaces de publicarlos es razón suficiente para creer en su exactitud. Así como el honor que se alcanza en el campo de la investigación nuclear con un adelanto de estas características es muy grande, también sería grande el error por pequeño que fuera y sería juzgado con mucha dureza.

¿Cómo se repartiría el honor? La guerra se interpuso y durante 3 años, de 1940 a 1942, no se hizo entrega de ningún premio Nobel. El premio Nobel de química de 1943 lo recibió George de Hevesy, por sus métodos de marcado con isótopos radiactivos de elementos estudiados.

⁷ El autor del artículo olvida mencionar que se trata de muy poca energía, que es grande solo en medidas relativas tales como la energía cinética de los átomos y que la unidad correcta de medida es el electronvoltio y no el voltio.

Recién después de la caída de Alemania un alemán pudo recibir el premio Nobel. Otto Hahn obtuvo en 1945 el premio Nobel de química de 1944 por el descubrimiento de la fisión nuclear. No se hizo entrega del premio Nobel de física, algo que amargó profundamente a Lise Meitner, quien deseaba compartirlo con Hahn. Pero Strassmann, que sin embargo era químico, tampoco pudo compartir el premio con Hahn. Quizá Meitner y Frisch deberían haber obtenido un premio Nobel compartido de física, pero no fue así. El descubrimiento había “quedado en el aire” y muchos otros quisieron atribuirse el logro.

El 1 de septiembre de 1939 el ejército alemán cruzó la frontera con Polonia, comenzando así la II Guerra Mundial. En los Estados Unidos los físicos refugiados Szilard y Wigner ya habían comenzado a contactarse con Albert Einstein, preocupados por la posibilidad de que el gobierno nazi alemán quisiera utilizar la energía nuclear como arma de destrucción. La preocupación tenía su fundamento. En Alemania dos jóvenes físicos de Hamburgo, *Paul Harteck* y *Wilhelm Groth*, ya le habían escrito al Ministerio de Guerra el 24 de abril de 1939 para atraer su atención y que considerara esta posibilidad. Al mismo tiempo el famoso profesor de química *Georg Joos*, sin tener conocimiento de la iniciativa tomada por sus colegas, le escribió al Ministerio de Educación señalando las consecuencias de un artículo de la publicación *Nature* aparecido el 22 de abril. En ese artículo los colaboradores de Joliot-Curie, *Hans von Halban* y *Lew Kowarski* advertían sobre la posibilidad de una reacción en cadena si la fisión del átomo demostrara que se podía generar un excedente de neutrones capaces de causar la fisión de otros átomos. Se había abierto la caja de Pandora.

| Bibliografía

- Ande 1945 Andersson, Ingvar m fl: *Ny svensk historia: Gustavianskt 1771-1810*. Wahlström & Widstrand, Stockholm (1945).
- D'Ab 1951 D'Abro, A.: *The rise of the new physics, its mathematical and physical theories. Volume 2, The quantum theory*. 2nd edition. Dover Publications, Inc. (1951).
- Benn 1969 Benner, Sven: "Ur röntgenrörens och röntgenapparaternas historia", *Sydsvenska Medicinhistoriska Sällskapets årsbok 1969*, s. 12-26.
- Benn 1974 Benner, Sven: *Radiofysik i Sverige. En kortfattad historisk överblick*. Svensk förening för radiofysik och Svenska fysikerförbundet. Umeå (1974).
- Berg 1964 Bergmark, Matts: *En bok om gifter och förgiftningar*. 2 uppl. Prisma, Stockholm (1964).
- Berg 1992 Bergström, Ingmar och Wilhelm Forsling: *I Demokritos fotspår*. Natur och Kultur, Stockholm (1992).
- Berv 1965 Berven, Elis: The General Department at Radiumhemmet 1910-1950. Ur "*The First Fifty*", *Acta radiol. Supplementum 250* (1965).
- Burr 1920 Burroughs, Edgar Rice: *The Warlord of Mars*. Methuen & Co. Ltd, London (1920).
- Cars 1955 Carson, Rachel: *Havet*. Tidens Bokklubb, Stockholm (1955).
- Cauf 1990 Caufield, Catherine: *Multiple exposures*. Penguin Books, London (1990).
- Chur 1897 Churchill, Winston S.: *The Story of the Malakand Field Force* (1897), sv. övers. *Striden om Malakand*. Skoglunds Bokförlag, Stockholm (1944).
- Curi 1937 Curie, Eve: *Madame Curie*. The Literary Guild of America, Inc., New York (1937). Sv. övers. *Min mor, Marie Sklodowska Curie*. Medéns förlag, Stockholm (1937)
- Darw 1859 Darwin, Charles: *The origin of species*. John Murray (1859).
Penguin Books (1970).
- Dess 1945 Dessauer, Friedrich: Röntgen - die Offenbarung einer Nacht. Ur serien *Kämpfer und Gestalter* (Bd 5). Otto Walter AG, Olten, Schweiz (1945).
- Eklu 1989 Eklund, Sigvard: *Lise Meitner och Otto Robert Frisch*. Föredrag i Kungälv 13 april 1989.
- Ferm 1955 Fermi, Laura: *Atoms in the family - My life with Enrico Fermi*. George Allen & Unwin Ltd, London (1955).

- Fors 1929
Held in Forssell, Gösta: A Report of the Second International Congress of Radiology, Stockholm 23rd-27th July, 1928. *Acta radiol.* Supplement III (1929).
- Fors 1946 Forssell, Gösta: Rolf Sievert on his 50th birthday. *Acta radiol.* **27** (1946), 209-222.
- Fris 1979 Frisch, Otto: *What little I remember*. Cambridge University Press (1979).
- Glas 1959 Glasser, Otto: *Wilhelm Conrad Röntgen und die Geschichte der Röntgenstrahlen*. 2:a uppl. Springer-Verlag 1959.
- Goer 1980 Goerke, Hans: *Fünfundsiebzig Jahre Deutsche Röntengesellschaft*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart (1980).
- Grig 1965 Grigg, E.R.N.: *The trail of the invisible light*. Charles C. Thomas Publisher, Springfield, (1965).
- Gust 1988 Gustavson-Kadaka, Evi: *Konung Gustav V:s Jubileumsklinik i Stockholm*. David Broberg AB, Stockholm (1988).
- Hahn 1975 Hahn, Otto: *Erlebnisse und Erkenntnisse*. Econ Verlag (1975).
- Hans 1965 Hanson, Sten (red): *Focus 2 - Materien*. Almqvist & Wiksell, Stockholm (1965).
- Hens 1957 Henschen, Folke: *Min långa väg till Salamanca*. Bonniers (1957).
- Hogb 1947 Hogben, Lancelot: *Vetenskap för alla*. Kooperativa förbundets bokförlag, Stockholm (1947).
- Holt 1933 Holthusen, Hermann och R Braun: *Grundlagen und Praxis der Röntgenstrahlendosierung*. Georg Thieme Verlag, Leipzig (1933).
- Holt 1959 Holthusen, Hermann, Hans Meyer och Werner Molineus: *Ehrenbuch der Röntgenologen und Radiologen aller Nationen*. Urban & Schwarzenberg, München (1959).
- Hult 1956 Hultqvist, Bengt: *Studies on naturally occurring ionizing radiations*. Diss. Kungl. Vetenskapsakademiens Handlingar, 4:e serien, Band 6, Nr. 3 (1956).
- Inte 1929 International X-Ray Unit Committee. *Recommendations*. P.A: Norstedt & Söner, Stockholm (1929).
- Joha 1979 Johansson, Ivar: *Blad ur genetikens historia*. Natur och Kultur, Stockholm (1979).

- Järn 1940 Järnh, Bror E.: *Järnh's Elektriska Aktiebolag 1890-1940. En jubileumsskrift*. Stockholm (1940).
- Klas 1959 Klason, Torbern: *Svensk Förening för Medicinsk Radiologi 1919-1939*. Särtryck ur Svenska Läkaresällskapets Handlingar Nr 78 (1959) s. 5-17.
- Klin 1934 Klinckowström, Axel: *Guldsaxen*. B. Wahlströms Bokförlag (1934), s. 138-145.
- Knut 1970 Knutsson, Folke: *Thor Stenbeck - svensk röntgenpionjär*. Nordisk Medicinhistorisk årsbok 1970, s. 219-232.
- Kohl 1901 Kohlrausch, Friedrich: *Lehrbuch der praktischen Physik*. 9 uppl. B.G. Teubner Verlag, Leipzig (1901).
- Laur 1904 Laurin, P G: *Om radium och öfriga aktiva ämnen*. Hugo Gebers förlag, Stockholm (1904).
- Lilj 1935 Liljeström, Alfred: *Teknikens naturvetenskapliga grunder*. Band 1 av *Uppfinningarnas Bok*. P.A.Norstedt & Söner, Stockholm (1935).
- Lind 1951 Lindell, Bo: *Radiofysik*. Radiofysiska institutionen, Stockholm (1951).
- Lind 1972 Lindell, Bo och Sven Löfveberg: *Kärnkraften, Människan och Säkerheten*. Liber Förlag, Stockholm (1972).
- Lore 1974 Lorentzon, Lars: *Radiofysiska institutionen 50 år, 1924-1974*. Statens strålskyddsinstitut rapport SSI:1974-034. SSI, Stockholm (1974).
- Luce 1968 Luce, Henry R. (Red.): *Time Capsule 1939*. Time-Life Books, New York (1968).
- Mack 1993 Macklis, R.M.: The Great Radium Scandal. *Scientific American*, August 1993, s. 78-83.
- Morg 1984 Morgan, J.R.: A history of pitchblende. *Atom* 329 (1984), 63-68.
- Moul 1993 Mould, Richard F.: *A Century of X-Rays and Radioactivity in Medicine*. Institute of Physics Publishing, Bristol (1993).
- Nati 1989 *Nationalencyklopedin*, Bokförlaget Bra Böcker, Höganäs (1989-1996).
- Nils 1967 Nilsson, Ernst: *Ärftlighetslärans urkunder - Mendelismens födelse och pånyttfödelse*. Bokförlaget Corona, Lund (1967).
- Pall 1989 Pallardy, Guy, M-J Pallardy och A Wackenheimer: *Histoire illustrée de la radiologie*. Les Éditions Roger Dacosta, Paris (1989).

- Powe 1993 Powers, Thomas: *Heisenberg's war*. Jonathan Cape, London (1993).
- Rams 1935 Ramstedt, Eva: *Marie Sklodowska Curie*. Kosmos 1934 (1935), s. 10-44.
- Rhod 1986 Rhodes, Richard: *The making of the atomic bomb*. Penguin Books, London (1986).
- Rich 1981 Richardson, J.F.: *The Australian Radiation Laboratory*. Australian Government Publishing Service, Canberra 1981.
- Schi 1959 Schinz, Hans: *60 Jahre medizinische Radiologie*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart (1959).
- Schu 1957 Schubert, Jack och Ralph E. Lapp: *Radiation - What it is and how it affects you*. Heinemann, London (1957).
- Siev 1932 Sievert, Rolf: *Eine Methode zur Messung von Röntgen-, Radium-, und Ultratrahlung nebst einige Untersuchungen über die Anwedbarkeit derselben in der Physik und der Medizin*. Diss. Supplementum XIV Acta radiol. (1932).
- Siev 1950 Sievert, Rolf: Medical Radiophysics in Sweden 1920-1950. *Acta radiol.* **33** (1950), 190-252.
- Siev 1957 Sievert, Rolf: The International Commission on Radiological Protection (ICRP). Ur *International Associations*. Palais d'Egmont, Bryssel (1957), 3-7.
- Siev 1975 Sievert, Rolf: *Svenska strålskyddsverksamhetens historia*. Statens strålskyddsinstitut rapport SSI:1975-028. SSI, Stockholm (1975).
- Simo 1926 Simon, Moritz: Stray remarks on the history of medical radiology in Sweden. *Acta radiol.* **7** (1926), 476-490.
- Smit 1975 Smith, Eric E.: *Radiation Science at the National Physical Laboratory 1912-1955*, National Physical Laboratory, Department of Industry, London, 1975.
- Snow 1962 Snow, C P: *Science and government*. Harvard University Press, Harvard (1962).
- Strå 1956 Strålskyddskommitté, 1951 års: *Strålskydd*. SOU 1956:38. Inrikesdepartementet, Stockholm (1956).
- Sven 1947 *Svensk Uppslagsbok*, 2 uppl. Förlagshuset Norden, Malmö (1947-1955).
- Tayl 1979 Taylor, Lauriston S.: *Organization for radiation protection. The operations of the ICRP and NCRP 1928-1974*. U.S. Department of Energy, Office of Technical Information. DOE/TIC-10124 (1979). 2 050 sidor!

- Tayl 1980 Taylor, Lauriston S.: Reminiscences about the early days of organized radiation protection. In *Health Physics: A backward glance* (Ed. R.L. Kathren & P.L. Ziemer), Pergamon Press, Oxford (1980).
- Thor 1932 Thoraeus, Robert: *A study of the ionization method for measuring the intensity and absorption of roentgen rays and of the efficiency of different filters used in therapy.* Diss. *Supplementum XV Acta radiol.* (1932).
- Unne 1984 Unnéus, Carl-Erik, m fl: *Nordisk Förening för Medicinsk Radiologi 60 år 1919-1979.* Nordisk Förening för Medicinsk Radiologi (1984).
- Vem 1912 *Vem är det?* Svensk biografisk handbok. P.A. Norstedt & Söner, Stockholm (aktuella årgångar 1912-1994).
- Vern 1907 Verne, Jules: *L'Île Mystérieuse* (1874-1875), sv. övers. *Den hemlighetsfulla ön.* Aktiebolaget Ljus, Stockholm (1907).
- Wein 1990 Weinberger, Hans: *Sievert: enhet och mångfald.* Kungl. Tekniska Högskolan och Statens strålskyddsinstitut. Stockholm (1990).
- Wett 1908 Wetterer, Josef: *Handbuch der Röntgentherapie.* Otto Nemnich Verlag, Leipzig (1908).
- Wint 1931 Wintz, Hermann och Walther Rump: *Protective measures against dangers resulting from the use of radium, roentgen and ultra-violet rays.* Health Organization of the League of Nations, Report C.H. 1054, Geneva (1931).

| Índice onomástico

El trabajo de recopilación de datos correctos parece ser una tarea de investigación que exige un tiempo del que no dispongo para este trabajo. En algunos casos he encontrado con facilidad la fecha de nacimiento pero no el año en que la persona falleció. He realizado una distinción entre “1908—” y “nacido en 1876” y he utilizado la primera anotación para aquellos que probablemente estén vivos todavía.

Abbe, Robert 1851-1928	125/6	Berven, Elis 1885-1966	139 a 143, 147/9, 163, 182
Abelson, Philip	230	Berzelius, Jöns Jacob	64
Agricola, se Georg Bauer	188	Bethe, Hans 1906-1779-1948	208, 220 a 223, 235
Albers-Schönberg, H 1865-1921	110/4/5, 120/1	Biot, Jean-Baptiste 1774-1862	36
Alhacén c:a 965-1040	16	Blandina, se Maria Ridder	121
Ampère, André Marie 1775-1836	36	Blum, Theodore f 1883	193/4
Amundsen, P	157	Bohr, Christian 1855-1911	107
Anaxágoras c:a 500-428 f.Kr.	15	Bohr, Niels 1885-1962	37 a 40, 107 a 111, 135 a 140, 199 a 211
Anderson, Carl D 1905-1991	223	Boltzmann, Ludwig 1844-1906	46
Andersson, John 1862-1939	76/8, 122, 140	Bonnier, Gert 1890-1961	154
Antioco III c:a 242-187 f.Kr.	27	Bordier, L 1863-1943	183
Aristóteles 384-322 f.Kr.	15, 50 a 54	Born, Max 1882-1970	199, 200, 203, 206
Arnold, William	200/37	Bothe, Walther 1891-1957	217/8, 220
Arrhenius, Svante 1859-1927	65, 85, 197	Bouchard, Charles 1837-1915	92
Aston, Francis W 1877-1945	217	Bouwens, A f 1893	163
Aurén, Tycho 1870-1955	145	Boyle, Robert 1627-1691	52, 63, 65
Baastrup, C I 1885-1950	143	Boys, C V	153
Bacher, R F	222	Braestrup, C B f 1897	163
Baer, Evon 1792-1876	51	Bragg, William 1862-1942	154
Bagge, Ivar 1865-1925	77/9, 117, 140/2	Braun, R	173
Bailey, William 1884-1949	191/2	Brogie, Louis de 1892-1987	116, 199, 201, 204
Balmer, Johann Jacob 1825-1898	45, 203	Brown, Robert 1773-1858	102
Bar, R	174	Bruker, Marshall f 1913	180
Barclay, Alfred 1876-1949	159, 163	Bucky, Gustav 1880-1963	121, 163
Barthélemy, Toussaint 1852-1906	113	Bunsen, Robert 1811-1899	44
Bartholin, R 1625-1698	23	Burroughs, Edgar Rice 1875-1950	193
Bauer, Georg 1494-1555	188	Byers, Eben M 1880-1932	191/2, 196
Béclère, Antoine 1856-1939	114/5, 163	Calder, Ritchie, se Ritchie-Calder	221
Becquerel, Alexandre 1820-1891	0	Caldwell, E W 1870-1918	121
Becquerel, Antoine 1788-1878	0	Campbell Swinton	74, 113, 132
Becquerel, Henri 1852-1908	0	Carlisle, Anthony 1768-1840	64
Behnken, H 1889-1945	163/7, 174/5/6/7	Carson, Rachel 1907-1964	56
Bell, Alexander Graham 1847-1922	124/5	Cartesius, se Descartes	17, 20/1
Beneden, Édouard van 1846-1910	5	Caufield, Catherine	190/3
Benner, Sven 1900-1986	117, 126, 145, 149, 151, 16	Cavendish, Henry 1731-1810	28, 67, 88
Berg, John 1851-1931	138/9, 140/1	Ceresole, G -1933	164, 170/1
Bergen, J F von 1877-1951	140	Chadwick, James 1891-1974	131, 216, 229
Berggren, Axel	159	Cherwell, Lord 1885-1957	154
Berle, E	157		
Bernstedt, Ragnar	151		

Christiansen, C	107	Euler, Leonhard 1707-1783	20 a 22, 28, 30
Churchill, Winston S 1874-1965	4, 75	Evans, Robley 1907-	193
Clausius, Rudolf 1822-1888	64	Eve, A S	133
Cleaves, Margaret 1848-1917	125	Exner, Franz Serafin 1849-1926	73
Cockcroft, John 1897-1967	220/1	Failla, Gioacchino 1890-1960	125, 163, 167, 183
Colón, Cristobal 1451-1506	27	Falkman	149
Cook, H L	67, 85, 131	Faraday, Michael 1791-1867	4, 29 a 42, 64 a 66, 85
Coolidge, William 1873-1975	119, 169	Feather, Norman 1904-1978	218
Correns, Carl 1864-1933	60	Fermat, Pierre de 1601-1665	4, 18 a 20
Coulomb, Charles de 1736-1806	26	Fermi, Enrico 1901-1954	201, 228, 243
Courant, Richard 1888-1972	201/3	Fermi, Laura 1907-1977	230 a 232
Cox, Sidney	159	Finsen, Niels R 1860-1904	77, 92
Cronsteen, Vera von f 1895	151	Fischer, Emil 1852-1919	133/4
Crookes, William 1832-1919	66	Fischer, J F 1868-1922	143, 182
Curie, Eve f 1904	91/2, 136	FitzGerald, Francis 1851-1901	100/1
Curie, Irène 1897-1956	228/ 231	Fitzroy, Robert 1805-1865	54
Curie, Jacques 1856-1941	84	Fizeau, Hippolyte 1819-1896	19
Curie, Marie 1867-1934	83 a 87, 91 a 92, 133	Flemming, Walter 1843-1905	60
Curie, Pierre 1859-1906	84 a 87, 91 a 93, 124, 132	Flemming Möller, ver Möller	
Dally, Clarence 1865-1904	74, 182, 192	Flinn, Frederick	195
Demokritos c:a 400- c:a 370 f.Kr.	96	Forsell, John 1868-1941	123, 139
Danlos, Henri 1844-1912	124	Forssberg, Arne, 1904-1975	140, 149 a 151
Darwin, Charles 1809-1882	44, 50 a 58, 101	Forssberg, Ulla	151
Darwin, Erasmus 1731-1802	53	Forssell, Abraham 1848-1937	140
Davy, Humphry 1778-1829	30, 64, 92	Forssell, Arne 1887-1974	140
Descartes, René 1596-1650	17 a 19, 28	Forssell, Carl 1881-1973	140
Dessauer, Friedrich 1881-1963	68/9, 124, 127, 161, 163	Forssell, Gerhard 1882-1964	140
Deycke, G 1865-1940	115	Forssell, Gösta 1876-1950	78, 116, 123, 139
Diebl, Franz	58	Forssell, Lars 1928-	140
Doppler, Christian 1803-1853	58	Foucault, Léon 1819-1868	19
Dorn, F E 1848-1916	88	Franklin, Benjamin 1706-1790	63, 66
Doyle, Sir Arthur Conan 1859-1930	153	Fresnel, Augustin 1788-1827	23
Duane, William 1872-1935	158, 163, 167	Freund, Leopold 1868-1943	114
Dufay, C F 1698-1739	27, 63	Friedrich, Walter 1883-1968	147
Duisberg Karl, 1861-1935	135	Frisch, Otto Robert 1904-1979	199, 210, 223, 235 a 241
Edison, Thomas A 1847-1931	74, 118, 188, 192	Fuchs, Wolfram 1865-1907	114, 153, 179
Edling, Lars 1878-1962	137, 143, 162/3	Galilei, Galileo 1564-1642	
Einstein, Albert 1879-1955	47, 83, 101 a 105, 121, 130, 199 a 222	Galvani, Aloisius 1737-1798	34/5
Ekstrand, Åke 1846-1933	65	Gamow, George 1904-1968	220/1, 224, 238/9
Elisabet I 1533-1603		Gamow, Rho	224, 238
Elster, Julius 1854-1920	131	Gassendi, Pierre 1592-1655	17
Empedokles 492-432 f.Kr.	2	Gauss, Carl Friedrich 1777-1855	32, 42
Ericsson, L M 1846-1926	144/5	Gebbert, Max 1856-1907	118
Erik, prins 1889-1918		Geiger, H 1882-1945	97, 105 a 108, 214/7, 225, 228
Esau, Abraham 1884-1955	185/6	Geissler, Heinrich 1814-1879	66/7, 117/8

Geitel, Hans 1855-1923	131	Heydrich, Reinhard 1904-1942	212
Giesel, F O 1852-1927	88, 91	Heyerdahl, Severin A 1870-1940	143/4, 163, 167
Gilbert, William 1544-1603	4, 27, 63, 167	Heyman, James 1882-1956	125, 141 a 143, 149, 162/3
Glasser, Otto 1895-1964	128, 147, 163	Hilbert, David 1862-1943	201/3
Gleditsch, Ellen 1879-1968	157	Himmler, Heinrich 1900-1945	211/12
Gmelin, Christian 1792-1860	189	Hitler, Adolf 1889-1945	132, 136, 176, 208 a 210
Gockel, A 1860-1927	131/2	Hittorf, Johann W 1824-1914	66 a 70, 75
Goebbels, Joseph 1897-1945		Hoffman, Frederick	174
Goldberg	124	Hohenheim, T von 1493-1541	188
Goldstein, Eugen 1850-1930	67	Holfelder, Hans (1891-1944)	127
Graaf, R de 1641-1673	51, 126, 127	Holm, Anne-Marie	151
Gray, Harold 1905-1965	168	Holm, G	140
Gray, Stephen 1666-1736	32/3, 63, 168	Holmberg, Carl-Bertil	185/6
Grew, N 1641-1712	51	Holmgren, Emil 1866-1922	76
Grigg, E R N 1916-	73/4, 182	Holmgren, Frithiof 1831-1897	74, 76
Grimaldi, Francesco Maria 1618-1663	23	Holthusen, Hermann 1886-1971	132, 163, 167, 175
Grossmann, Gustav 1878-1957	25, 161 a 164, 174/6/7	Holzknicht, Guido 1872-1931	123/4, 157, 165
Groth, Wilhelm	241	Hooke, Robert 1635-1703	52
Grubbé, Emil Herman 1875-1960	116, 179	Horthy, Miklós 1868-1957	203
Guericke, Otto von 1602-1686	63, 65	Huygens, Christiaan 1629-1695	17, 20, 24, 99
Gustaf (VI) Adolf 1882-1973	163	Hönigschmid, Otto 1878-1945	153
Gustafsson, Åke 1908-1988	159	Ising, Gustaf 1883-1960	147
Gustav V 1858-1950	149	Jaeger, Robert f 1893	163, 176
Göring, Hermann 1893-1946	190	Janeway, Henry 1873-1921	125
Haber, Clara Immewahr 1870-1915		Janssen, Jules 1824-1907	
Haber, Fritz 1868-1934	134 a 136, 208, 210	Joliot, Frédéric 1900-1958	217, 224/5
Haglund, Patrik 1870-1937	140, 151	Joliot Irène 1897- 1956	217, 224
Haglund, Paul	147	Joos, Georg 1894-1959	241
Hahn, Otto 1879-1968	9, 11, 19	Jordan, Pascual 1902-1980	203
Halban, Hans von 1877-1947	79, 133 a 136, 230 a 241	Järnh, Bror Edvard 1879-1956	122, 140 a 143
Harteck, Paul 1902-1985	241	Kalckar, F	223
Harvey, William 1578-1657	51	Kapitsa, Pjotr 1894-1984	217, 219
Hauksbee, Francis c:a 1666-1713	63, 65	Kaufmann, W 1871-1947	163
Heisenberg, W 1901-1976	199 a 212, 219, 224	Kaye, G W C 1880-1941	154 a 164, 168 a 176
Helmholtz, Hermann von 1821-1894	46, 122	Kelly, Howard 1859-1943	125, 217
Henry, Joseph 1797-1878	40	Kelvin, Lord 1824-1907	50, 48, 85, 88
Henschen, Folke 1881-1977	76/7	Kepler, Johannes 1571-1630	17, 51
Henschen, Salomon 1847-1930	76/8	Kienböck, Robert 1871-1953	123/4, 163
Henslow, John 1796-1861	54	Kirchhoff, G 1824-1887	44
Herakleitos 500-400-talen f.Kr.		Kitto, E	177
Hermite, Charles 1822-1901	202	Klaproth, Martin 1743-1817	184
Hertwig, Oscar 1849-1922	60	Klason, Torbern 1889-1979	147
Hertz, Heinrich 1857-1894	5, 7, 44, 67, 69, 130	Klein, Georg 1925-	208
Hess, Victor 1883-1964	131		
Hevesy, George de 1885-1966	108, 208, 226, 237, 240		

Kleist, E von 1700-1748	32	Mache, Heinrich 1876-1934	153
Cleómedes	17	Machlett, E	118
Klinckowström, Axel 1867-1936	196/7	Machlett, Raymond 1900-1955	118
Knox, Robert 1867-1928	132, 156	Machlett, Robert 1872-1926	118
Knutsson, Folke 1901-1993		MacIntyre, John 1857-1928	113/4
Kohlhörster, W	131/2	Malinowski, B 1884-1942	50
Kohlrausch, Friedrich 1840-1910	73	Malthus, Thomas 1766-1834	55
Kohlrausch, Rudolf 1809-1858	43, 85	Malus, E L 1775-1812	24
Kovalski, J	84	Marsden, Ernest 1889-1970	105 a 108, 214/5
Kowarski, Lew 1907-1979	241	Martland, Harrison 1883-1954	194/5
Kun, Béla 1886-1939	208	Masefield, John 1878-1967	135
Kundt, August 1839-1894	68	Matthews	184
Küstner, Hans f 1887	163, 173	Maxwell, James Clark 1831-1879	38 a 44, 67 a 70, 82, 98 a 108
Laborde, E	132	Mayneord, W V 1902-1988	17, 163
Lamarck, J-B de 1744-1829	53/4, 56	McMillan, Edwin 1907-1991	230
Lamb, J	75	McNeile, Cyril 1888-1937	196
Langmuir, Irwing 1881-1957	118	Meitner, Lise 1878-1968	131 a 134, 208 a 210, 223/4, 231 a 243,
Laplace, P S de 1749-1827	32	Melville, Stanley 1868-1934	156, 161 a 164, 171/4/7
Laue, Max von 1879-1960	109, 199, 200, 218	Mendel, Johann "Gregor" 1822-1884	57 a 60
Laurin, P G 1863-1935	73, 90, 245	Mendeleviev, Dmitrij 1834-1907	108
Lawrence, Ernest 1901-1958	127	Mesmer, Franz 1734-1815	33/4
Ledoux-Lebard, R 1879-1948	171, 175	Meyer, Hans 1877-1964	155, 163, 180, 244
Lecher, Ernst 1856-1926	73	Meyer, Stefan 1872-1949	132
Leeuwenhoek, A van 1632-1723	51/2	Michelson, Albert 1852-1931	99, 100
Lehman, Edwin -1925	195	Minkowski, Hermann 1864-1909	101
Lehmann, Otto	6	Morley, Edward 1838-1927	99, 100
Lenard, Ph von 1862-1947	67 a 70, 96, 105, 130, 133, 186, 199, 200, 211	Moseley, Henry 1887-1915	108/9, 135, 214
Lennander, K G 1857-1908	77/8	Muller, Hermann 1890-1967	159, 183
Leonardo da Vinci 1452-1519	23	Mutscheller, Arthur f 1886	158, 159, 173
Liljeström, Alfred 1882-1953	15 a 23, 24 a 39, 64 a 67, 105, 131	Müller, C H 1845-1912	118
Lindemann, se Cherwell	154	Müller, Walter	105
Linné, Carl von 1707-1778	52	Nagaoka, Hantaro 1865-1950	96, 107
Lippman, Gabriel 1845-1921	84	Nakaidzumi, M 1895-	163, 167
Lockyer, Norman 1836-1920	90	Napoleón I 1769-1821	66
Lodge, Sir Oliver 1851-1940	153	Napoleón III 1808-1973	66
London, Efim S 1869-1939	10	Neumann, John von 1903-1957	208
Lorentz, Hendrik 1853-1928	67, 85, 100 a 104	Newell, O A	184
Lorentzon, Lars f 1905	124, 245	Newell, R R 1892-1965	189
Loschmidt, Joseph 1821-1895	64	Newton, Isaac 1643-1727	18
Lucrecio, Titus c:a 95- c:a 55 f.Kr.4,	15 a 17, 28	Nicholson, William 1754-1815	64
Luis XV 1710-1774	27	Noddack, Ida 1896-1978	230/1
Lundgren, Gunnar f 1893	143, 145	Nyström, Gunnar 1877-1964	141
Lyell, Charles 1797-1875	54/5	Nägeli, Carl von 1817-1891	52, 58
Lysholm, Erik 1891-1947	126	Ohm, G S 1787-1854	39, 64
Lysenko, Trofim 1898-1976	53		

Oppenheimer, Robert 1905-1967	199, 201	Redi, Francesco 1626-1697	51
Orndoff, B H 1881-1971	163	Reiniger, Erwin 1854-1909	118
Oudin, Paul 1851-1923	137	Renander, Axel 1895-1968	162
Owen, E A f 1887	154/8, 163, 167	Reuterwall, Olle 1888-1956	146/9
Pancoast, H K 1875-1939	169	Ribbing, Seved 1902-1993	78
Paneth, Friedrich 1887-1958	226	Richardson, Owen 1879-1959	118
Panner, H J f. 1871	143	Ridder, Maria 1871-1916	181
Paracelsus, se Hohenheim	188/9	Riedl, Joseph	189
Parker, Herbert 1910-1984	124	Rimmer, T	133
Parménides 500-400-talet f.Kr.	15	Ritchie-Calder, Lord 1906-1982	221
Pasteur, Louis 1822-1895	57	Rolleston, Humphry 1862-1944	156, 163
Patterson, Ralston 1897-1981	124, 163	Rosbaud, Paul	234
Patterson, Carl f 1888		Rosenfeld, Léon 1904-1974	238
Pauli, Wolfgang 1900-1958	111, 199, 200, 203, 208, 224	Royen, W van, se Snellius	17
Payne, Ernest f 1875	115	Rump, Walther f 1878	170
Peligot, Eugène	189	Russ, Sidney 1879-1963	13
Peregrinus 1200-talet		Rutherford, Ernest 1871-1937	83, 88, 105
Perussia, F 1885-1959	163	Rydberg, Janne 1854-1919	45
Pettersson, Hans 1888-1966	240	Rühmkorff, Heinrich 1803-1877	66
Pfahler, G E 1874-1957	162	Römer, Ole 1644-1710	17 a 19
Picard, Jean 1629-1682	63, 65	Röntgen, Wilhelm Conrad 1842-1923	4, 62, 68 a 73, 82 a 90, 105, 108, 113 a 117, 130/3, 140, 148, 152 a 158, 153, 161, 173,
Pirchan, August	189	Sahlbom, Naima f. 1871	132
Placzek, George	237	Savart, Félix 1791-1841	36
Planck, Max 1858-1947	45 a 48, 102, 199, 206, 210	Scheer, Ragnar	148
Plücker, Julius 1801-1868	66	Schinz, Hans R 1891-1966	163
Poincaré, Henri 1854-1912	73, 82, 113	Schleiden, Matthias 1804-1881	52
Poisson, Simeon D 1781-1840	32	Schrödinger, Erwin 1887-1961	199, 203 a 207
Porter, A W 1865-1939	154	Schuster, Arthur 1851-1934	67, 73
Potter, Hollis E 1880-1964	121, 163	Schwann, Theodor 1810-1882	52
Poynting, J H 1852-1914	44	Schönander, Georg 1894-1958	142
Prinsessan av Anhalt-Dessau	2	Sedgwick, Adam 1785-1873	54
Prout, William 1785-1850	214/5	Segrè, Emilio 1905-1989	207
Ptolemaios död c:a 165 e Kr	2	Shearer, J S 1865-1922	162
Pugno-Vanoni, E f 1899	167, 171 a 176	Siegbahn, Manne 1886-1978	111, 167
Pupin, Michael I 1858-1935	74	Siemens, W von 1816-1892	172
Quimby, Edith f 1891	128, 163	Sievert, Ernst, 1863-1941	145
Rabi, Isidor Isaac 1898-1988	238/9	Sievert, Georg 1861-1942	144
Rajewsky, Boris 1893-1974	163	Sievert, H T	144
Ramsey, William 1852-1916	90	Sievert, Lisa	144
Ramstedt, Eva f 1879	87, 157	Sievert, Max, 1849-1913	143
Rasetti, F	228/9	Sievert, Rolf, 1896-1966	3, 7, 13, 128, 138, 144 a 157, 162 a 188, 196
Rath, E vom: se Vom Rath	232	Sievert, Sofia Carolina, ver	
Rayleigh, Lord 1842-1919	45, 67, 88, 90	Pancheen, Sofia Carolina	144
Reckams, Alexander 1100-talet	27		

Simon, Moritz 1884-1959	79, 122/3, 139, 143	Walkhoff	91
Sjögren, Hjalmar 1856-1922	132	Wallace, Alfred 1823-1913	55
Sjögren, Tage 1859-1939	76 a 79, 116/7, 122, 140, 143	Wallensteen	33
Skłodowska, Marya	83/4	Walstam, Rune 1923-	16
Snellius 1580-1626	17	Walton, Ernest 1903-1995	220 a 222
Soddy, Frederick 1877-1956	88 a 93, 97, 108, 153, 214	Van de Graaff, Robert 1901-1967	126/7
Sohocky, Sabin A 1882-1926	192 a 195	Watson, William 1715-1787	33
Soiland, Albert 1873-1946	122, 163	Weber, Gustav f 1901	142
Sollman, Torald	190	Weber, Wilhelm 1878-1935	142
Solomon, Iser 1880-1939	163/4/7, 171, 174/5/7	Weber, Wilhelm 1804-1891	42
Solvay, Ernest 1838-1922	208	Wedgwood, Emma	55
Sommerfeld, Arnold 1868-1951	199, 200, 205, 208, 210/1/2	Wedgwood, Josiah 1730-1795	54
Spencer, Herbert 1820-1903	56	Vegard, L	157
Stanton, A	73	Weismann, A	56
Stark, Johannes 1874-1957	199, 211	Weizsäcker, Carl Friedrich von 1912-209, 222	222
Stefan, Joseph 1835-1893	46, 132	Weizsäcker, Ernst von 1822-1951	209
Stenbeck, Thor 1864-1914	77 a 79, 113, 116, 139	Weizsäcker, Richard von 1920-	209
Stenström, K W f 1891	163	Wells, H G 1866-1946	97, 225
Stoney, G J 1826-1911	47, 64, 67, 85	Verne, Jules 1828-1905	9 a 12, 66, 82, 97
Strandqvist, Magnus 1904-1978	179	Werner, W S 1895-1939	122, 169
Strassmann, Fritz 1902-1980	231 a 241	Wheeler, John f 1911	238
Strebel, H	125, 126	Victoria, drottning 1862-1930	140, 142
Strutt, J, se Rayleigh	45	Wien, Wilhelm 1864-1928	45, 46, 199, 206
Strömholm, D 1871-1961	214	Wigner, Eugene 1902-1995	199, 201, 208, 241
Sundelius, H O	34	Wiksn, Lily	151
Svanberg, Olof 1896-1975	144	Victor Manuel III 1869-1947	230
Svedberg, The 1884-1971	197, 214	Wilhelm II 1859-1941	134
Swinton, Archibald Campbell 1863-1930	74, 113/4	Villard, Paul 1860-1934	88, 158
Szilard, Leo 1898-1964	199, 208, 241	Wilson, Charles 1869-1959	130 a 132
Tamm, Viking 1896-1975	144	Winn, Robert H	192
Tank, F	174/5	Wintz, Hermann 1887-1958	170
Taylor, Lauriston S 1902-11 a 164, 169 a 177, 183		Virchow, Rudolf 1821-1902	53
Teller, Edward f 1908	199, 208, 238/9	Vitello	18
Tales de Mileto c:a 640-550 f.Kr.	27	Viviani, Vincenzo 1622-1703	17
Thompson, Silvanus P 1851-1916	114	Volta, Alessandro 1745-1827	4, 34/5, 66, 207
Thomson, Elihu 1853-1937	153	Vom Rath, E. -1938	232
Thomson, J J 1856-1940	221	Wood, F C 1869-1951	169
Thomson, W, ver Kelvin		Wood, R W 1868-1955	131
Threlkeld-Edwards, H 1870-1922	120	Wright, C J f 1874	131
Thoraeus, Robert 1895-1970	149 a 151	Wulf, T	131/2
Tingsten, Herbert 1896-1973	144	Young, Thomas 1773-1829	24/5
Trabacchi, Giulio Cesare	228/9	Åkerlund, Åke 1887-1958	139, 142/3
Unger, Franz 1800-1870	58	Ångström, Anders 1814-1874	76
Waldeyer, Wilhelm (1836-1921)	60	Ångström, Knut 1857-1910	76
Valentin, Guido 1895-1952	144	Öhrwall, Hjalmar 1851- 1929	74
		Ørsted, Hans Christian 1777-1851	230

| Índice

Prólogo del autor	
Prólogo a la edición en español	3
1. La isla volcánica	8
2. La luz	14
3. Electricidad y magnetismo	26
4. Las ondas electromagnéticas	37
5. Darwin y Mendel	49
6. Los rayos del profesor Röntgen	62
7. Los pioneros röntgenianos	72
8. Radiactividad natural	81
9. El átomo sorprendente	95
10. La infancia de la radiología	112
11. Oscurece al acercarse la Primera Guerra Mundial	129
12. John Berg, Radiohemmet, Forssell y Sievert	142
13. La radioprotección internacional y las mediciones de radiación antes de 1928	152
14. ICRP, ICRU y NCRP: Los primeros tiempos	160
15. Lesiones por radiación y rayos mortales	178
16. Los peligros del radio y el radón	191
17. La nueva física teórica	198
18. El descubrimiento del núcleo atómico	213
19. Explosiones atómicas por error	227
Bibliografía	242
Índice onomástico	248



S.A.R.

Sociedad Argentina
de Radioprotección

ISBN 978-987-26798-1-1



9 789872 679811