



Radiografía de la mano de Berta Röntgen.



Una radiografía cien años después, realizada por el Dr. Juan Luis Maza Martín (médico de la UNED).

del descubrimiento, ya lo incluía en uno de los apéndices del libro, proporcionando noticias sobre los diversos trabajos que en la época se estaban llevando a cabo sobre las aplicaciones de estos rayos.

Los rayos X estuvieron presentes en experimentos anteriores al de Röntgen, pero los investigadores que los realizaron, o el estado de la Ciencia en esos momentos, no estaban preparados para el descubrimiento. Así sucedió con el propio Crookes, que hacia 1880 observó cómo se le velaban unas placas fotográficas que, herméticamente cerradas en su caja, tenía cerca del tubo de rayos catódicos en funcionamiento. Lo atribuyó a un defecto de fabricación y se quejó por ello a su proveedor. Algo parecido le sucedió a Philipp Lenard hacia 1888 cuando trataba de detectar radiación ultravioleta procedente del tubo de rayos catódicos. Observó fluorescencia fuera del tubo. Cuando repitió el experimento en 1893, con vacío y voltaje más elevados, volvió a observar fluorescencia sobre su pantalla y ennegrecimiento de una película fotográfica, pero no llegó a comprender la causa. Otro físico, el norteamericano Arthur W. Goospeed, profesor de la Universidad de

Pensilvania, en 1890 obtuvo, sin proponérselo, la radiografía de dos monedas que estaban sobre una placa fotográfica, guardada en su estuche cerca de un tubo de rayos catódicos en funcionamiento. Tampoco se percató de la importancia del asunto.

Volviendo a Röntgen, sí podemos hablar *a posteriori* de algunas circunstancias fortuitas por las que él pudo observar los rayos X y los otros no. La pantalla utilizada por él contenía átomos pesados, y la eficiencia de producción de fotoelectrones por interacción con los rayos X (fotoelectrones que son responsables de la posterior fluorescencia) aumenta con la cuarta potencia del número atómico. A este respecto, la pantalla de platino-cianuro de bario de Röntgen era cien veces más eficaz que la de Lenard. Por otra parte, los rayos X producidos en el experimento de Röntgen, que se deben al brusco frenado de las cargas eléctricas de los rayos catódicos en las paredes del tubo («*bremsstrahlung*»), presentan un pico de intensidad entre 20 y 30 keV. El calcio de los huesos y las sales de plata de la emulsión fotográfica tienen un máximo de absorción para los rayos X pre-

cisamente a esas energías. Por eso pudo Röntgen obtener fácilmente la radiografía de la mano de su esposa Berta. Por estas razones y, sobre todo, porque andaba buscando los rayos invisibles de alta frecuencia y elevada penetración en la materia, Röntgen fue capaz de descubrir los rayos X.

En los trabajos de investigación la suerte sonrío a veces, pero sólo los que están preparados para recibir esa sonrisa son capaces de apreciar su valor. Es el caso de Wilhelm Conrad Röntgen, que obtuvo en 1901 el primer Premio Nobel de Física de la Historia por este descubrimiento.

Nota: Para ahondar más en el tema, el lector curioso puede leer el artículo titulado «*Wilhelm Conrad Röntgen and the glimmer of light*», de **Howard H. Seliger**, aparecido en *Physics Today* en noviembre de 1995.

Manuel Yuste Llandres
Depto. de Física de los Materiales

El experimento de Friedrich, Knipping y Laue (1912)

Entre los experimentos decisivos para la evolución de nuestra comprensión del mundo físico, no hay duda que el de la difracción de los rayos X por los cristales, llevado a cabo por Max Laue en 1912, es uno de los más significativos, no sólo por las características intrínsecas del mismo y las consecuencias que de él se derivaron, sino porque desvela facetas a menudo soslayadas al considerar la creación científica.

Como se expone, con mayor o menor detalle, en gran parte de los textos que se ocupan, a distintos niveles, de la estructura de la materia, y, en concreto, de la física del estado sólido [1], nos detendremos sólo en resaltar las circunstancias que lo propiciaron, el impacto y desarrollo posteriores y los temas de reflexión a que nos invitan.

A principios de siglo la Cristalografía había alcanzado un grado de madurez considerable. Se admitía que los átomos y las moléculas, constituyentes del cristal a nivel microscópico, debían acomodarse según una ordenación periódica tridimensional, la cual determinaba y podía, por lo tanto, inferirse de su apariencia morfológica externa, es decir, de la disposición de las caras. Para estas medidas sólo se disponía de herramientas de precisión limitada, como el goniómetro óptico o el microscopio de luz polarizada, con lo que la localización de los átomos resultaba ambigua o imposible. Incluso muchos consideraban la red cristalina como una mera hipótesis y no como una representación fidedigna de la realidad del cristal.

Alrededor de 1910 residía en Munich un grupo excepcional de científicos [2], uno de ellos Paul H.R. von Groth considerado la autoridad máxima mundial de la cristalografía, ya utilizaba modelos de estructuras cristalinas en sus clases. Había también otro grupo numeroso dedicado al estudio de los rayos X liderado, en su vertiente experimental, por su mismo descubridor (en 1895) W.C. Röntgen y en la teórica por A. Sommerfeld, al que se incorpora en 1909 Max T.F. Laue, discípulo de M. Planck en Berlín. Estos y otros grupos se encuentran con frecuencia y, naturalmente, hablan de los temas que les ocupan, no sólo en cursos y seminarios formales sino también en su lugar favorito de reunión, el Café Lutz en el Hofgarten.

En esta atmósfera, Sommerfeld indica a su doctorando Paul P. Ewald, a punto de leer el 12 de febrero de 1912 una tesis sobre las propiedades ópticas (luz visible) de los cristales considerándolos como una colección de resonadores isotropos ordenados según una red ortorrómbica, que consulte a Laue, quien acaba de escribir un capítulo sobre óptica ondulatoria para la *Encyklopadie der mathematische Wissenschaften*. Las dificultades del joven Ewald no se resuelven, pero Laue, que se ha

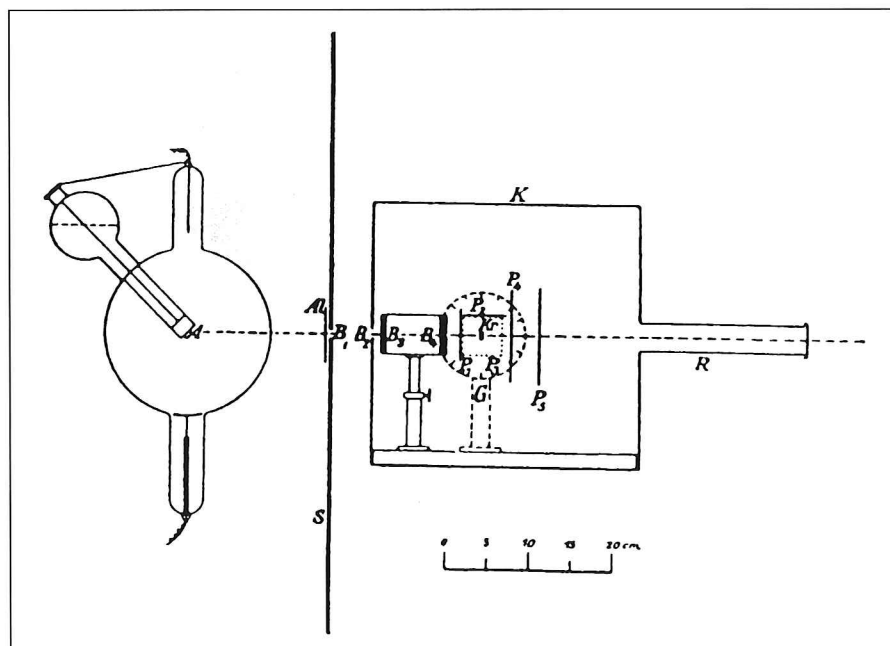


Fig. 1. El dispositivo montado por Friedrich y Knipping.

interesado por el tema, intuye que la estructura reticular de resonadores que representa el cristal, con separaciones del orden de 1 \AA , es la versión tridimensional de la rejilla clásica de difracción para el espectro visible que puede ser apta para difractar los rayos X, que se sabe que son una onda electromagnética, cuya longitud no se ha podido determinar aún, pero que se estima en unas décimas de Å (Sommerfeld).

Laue comunica y discute estas ideas con Sommerfeld, Wien y otros y las presenta en una seminario. En la teoría aparecen ciertas incertidumbres, pero el entusiasmo de Laue capta a dos jóvenes, Walther Friedrich, ayudante de Sommerfeld, y Paul Knipping, doctorando de Röntgen, para llevar a cabo el experimento [3].

Se montó un dispositivo muy simple, incluso rudimentario. Un monocristal de sulfato de cobre, proporcionado por von Groth, colocado en una cabeza goniométrica recibía, gracias a un colimador, un haz fino de 1 mm de sección procedente de un tubo de rayos X, prestado por Röntgen. A diferentes distancias del cristal y con distintas orientaciones se colocaron placas fotográficas en las que se confiaba registrar los haces difractados, todo ello en el interior de una cámara

revestida con plomo para evitar la radiación indeseable.

El trabajo se comenzó el 21 de abril y después de un fallo inicial los resultados fueron completamente convincentes. Se presentaron en las sesiones del 8 de junio y del 6 de julio de 1912 en la *Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften* de Munich, con las fotografías que mostraban los grupos de manchas producidos por los haces difractados, o, quizá en términos más sugerentes, seleccionados por el cristal de conformidad con su estructura periódica propia.

Tan pronto como las nuevas del descubrimiento llegaron a la comunidad científica se vió claramente su transcendencia. El mismo A. Einstein escribía el 21 de junio: «¡Es la cosa más maravillosa que jamás he visto!». No sólo quedaba establecida la naturaleza ondulatoria de los rayos X, sino que simultáneamente se hacía tangible la identificación de los cristales como una estructura periódica de sus átomos (o eventualmente sus moléculas) constituyentes.

En el mismo verano de 1912 W.H. Bragg, de la Universidad de Leeds, contó a su hijo W.L. Bragg, entonces estudiante en Cambridge, lo ocurrido en Munich. Empezaron sus investigaciones y propusieron una

explicación teórica del fenómeno, mucho más sencilla que la desarrollada por Laue, basada en una analogía óptica, la reflexión selectiva por capas de planos reticulares, y que conducía a la hoy conocida como ley de Bragg: $n \lambda = 2d \sin \theta$ [4]. Publicaron un artículo conjunto en abril de 1913, que ha sido llamado el fundamento de la ciencia del análisis por rayos X de los cristales, al que siguieron otros con la determinación de la estructura de materiales cristalinos simples como la sal común, la fluorita, la calcita y la pirita.

La concesión, casi inmediata, del Premio Nobel a Laue en 1914 y a los Bragg en 1915 es el reconocimiento del nacimiento de unas poderosas técnicas de investigación de la arquitectura interna de los cristales [5]. Los sucesivos métodos de difracción de rayos X, al permitir conocer con precisión creciente la posición de los constituyentes atómicos, harían posible establecer el resultado de sus interacciones y con ello explicar las propiedades macroscópicas de los distintos tipos de cristales. Se habían sentado las bases para la descripción de la materia condensada y, en consecuencia, de los desarrollos tecnológicos de nuestros días [6].

NOTAS, COMENTARIOS Y CURIOSIDADES

[1] Un acontecimiento científico de la transcendencia del experimento realizado por Laue, Friedrich y Knipping, ha dado lugar a una pléyade de relatos sobre las singulares circunstancias que en él concurrieron, incluyendo los de sus protagonistas y de quienes, desde distintos campos y naciones, participaron activamente en la fundamentación y en el desarrollo de las técnicas radiográficas. Un buen principio para un recorrido bibliográfico pueden ser:

— L. Hodesson *et al.*, eds., *Out of the Crystal Maze*, Oxford U.P., Oxford, 1992.

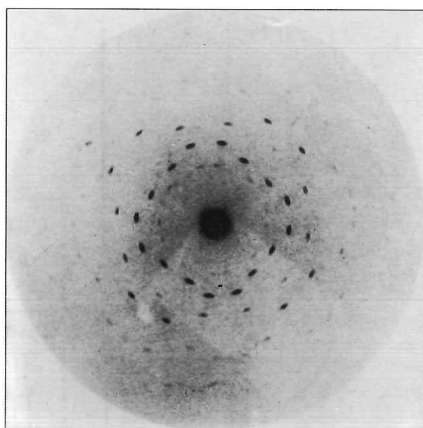


Fig. 2. La primera imagen de difracción de rayos X por cristales de sulfato de zinc.

— J. Lima-de-Faria, ed., *Historical Atlas of Crystallography*, IUC & Kluwer, Dordrecht, 1990.

[2] ¿Cómo encaja el descubrimiento de Laue y su papel crucial en el nacimiento de la moderna física de la materia condensada en las propuestas historiográficas de T.S. Kuhn en *The Structure of Scientific Revolutions*, U. Chicago Press, Chicago, 1962? ¿Cómo describirlo en términos de las categorías de ciencia normal y de ciencia extraordinaria, de paradigmas y de crisis? Hay un debate todavía candente entre los historiadores de la ciencia, a la busca de una función actividad científica global dependiente del tiempo y de la comunidad científica.

A este respecto, cualquiera que vaya conociendo más detalles y más conexiones de la situación científica, histórica y social en el breve período que transcurre entre la idea de Laue y la realización con éxito de la misma, no puede substraerse a la sensación de lo historicamente inescapable, de lo que indefectiblemente tenía que suceder. Todo ocurre intensamente en unos pocos meses, en la ya mítica primavera bávara del 1912, pero el escenario social e intelectual y los protagonistas estaban allí y entonces. Inevitabilidad —el no poder ser de otra manera— semejante a la que se intuye en el orden espacial y cromático de ciertas obras excelsas de arte, en la secuencia de sonidos y timbres de las composiciones de unos pocos genios de la música, en las formas

poéticas y narrativas de las obras maestras de la literatura.

[3] Quien tenga curiosidad por conocer en profundidad la técnica de difracción de rayos X por los cristales utilizada en los primeros experimentos, y que sigue de permanente actualidad, no puede dejar de consultar la excelente monografía:

— J.L. Amorós, M.J. Buerger & M. Canut de Amorós, *The Laue Method*, Academic Press, New York, 1975.

[4] Es curioso que la aparición simultánea de dos modelos teóricos tan aparentemente dispares para la explicación de un mismo fenómeno, uno partiendo de la difracción por un retículo de *puntos* (Laue) y otro tomando como elementos fundamentales *planos* reticulares (Bragg), no despertó las resonancias epistemológicas que cabía esperar.

Estamos inclinados a considerar la red cristalina como una distribución ordenada de puntos, probablemente debido a nuestra concepción atomística de la naturaleza, pero tal vez un cristalógrafo más ingenuo «vería» el cristal formado primordialmente por planos, como deducción obvia de su aspecto externo. Ambos *puntos de vista* son igualmente *correctos* y con ello apuntamos a uno de los caracteres esenciales de la naturaleza del mundo físico: la *dualidad*. Los espacios directo y recíproco son dos aspectos de la misma realidad física, como lo son una función matemática de las coordenadas de puntos y su transformada de Fourier, que es, en último extremo una función de coordenadas de planos. Al examinar la estructura de los cristales por medio de ondas planas, es de esperar que los resultados encontrarán su expresión más simple y diáfana si describimos el cristal como un conjunto de planos, es decir, mediante la red recíproca y el análisis de Fourier.

Por desgracia las presentaciones habituales de la red recíproca como una «red puntual» ficticia impiden al lector apresurado darse cuenta cabal de las consecuencias implicadas en la dualidad. Este error de

enfoque nace, posiblemente, de motivos psicológicos, y tiene sus raíces en nuestra dificultad en imaginar un «plano» (que se extiende hasta el infinito y que, por ello, representamos, incluso mentalmente, como una especie de hoja plana rectangular finita) en comparación con la facilidad de «visualizar» un punto. Sería ciertamente fascinante examinar, con profundidad y extensión adecuadas, si esta limitación de nuestra percepción es una cualidad inherente de nuestra mente o bien una tendencia adquirida, y cómo influye en nuestra imagen de la realidad externa (por ejemplo, su responsabilidad en el retraso del descubrimiento de la Mecánica Cuántica).

[5] Debería aconsejarse a los jóvenes licenciados que se dediquen, si son ambiciosos, a las investigaciones cristalográficas. Hasta 1985 ya se habían concedido 21 Premios Nobel a físicos y químicos asociados con rayos X y con cristales, a pesar de que por entonces se contaba con unos diez mil cristalógrafos (Physics Today, Dec. 1986).

[6] Este relato abarca hasta 1914 y el protagonista era tan sólo Max Laue, aunque tuviese ya un gran prestigio, pues, entre otras cosas, había escrito la primera monografía completa y rigurosa sobre la teoría de la relatividad: *Das Relativitätssprinzip*, Vieweg, Braunschweig, 1907 (que el propio Einstein confesaba no entender del todo). En 1914 el padre de Max, recibía un título nobiliario por el que podía añadir el «von» delante del apellido. A partir de esta fecha ya tendrá que hablarse de Herr Professor Max von Laue.

Antonio Bernalte Miralles
Depto. de Física de los Materiales

La UNED y el radio de La Tierra

El geógrafo, poeta, filósofo, músico, matemático y astrónomo griego ERATÓSTENES (*Σπρατοσθένης*), que nació en Cirene el año 276 antes de J.C. y que vivió en Atenas hasta que su fama hizo que Tolomeo

Evergetes lo llamara para dirigir la biblioteca de Alejandría, donde murió hacia el año 195 antes de J.C., además de proporcionarnos la famosa «criba» que utilizábamos en el bachillerato para construir la tabla de los números primos, de inventar la esfera armilar y de idear el calendario juliano, fue el primero que midió el radio terrestre. Hoy, más de dos mil años después, nos disponemos a rememorar su experimento utilizando la red de Centros Asociados de la UNED.

Cuando Eratóstenes hizo su medida, utilizó las dos hipótesis siguientes:

- La Tierra es redonda.
- El Sol se encuentra muy lejos de ella, de manera que los rayos que alcanzan su superficie pueden considerarse paralelos.

Si escogemos los puntos 1 y 2 de la superficie terrestre (ver

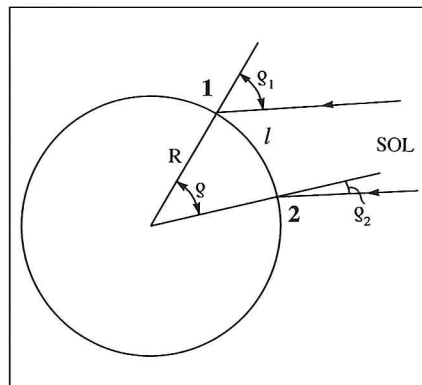


Figura 1.

Figura 1) de manera que se encuentren sobre el mismo meridiano, la determinación de los ángulos ρ_1 y ρ_2 , que forman los rayos del Sol con las respectivas verticales en el mismo instante del día, permite obtener el ángulo $\rho = \rho_1 - \rho_2$, diferencia de ambos, que corresponde al arco de meridiano definido por dichos puntos. Si se mide la longitud l de este arco (distancia entre los puntos 1 y 2 sobre la esfera) la relación entre ρ y l nos permite determinar el radio R de La Tierra:

$$R = \frac{l}{\rho}$$

Para garantizar la simultaneidad de las medidas, lo más adecuado es determinar los ángulos en el instante en que el Sol pasa por su altura máxima durante el día, ya que esto corresponde al paso por el meridiano del lugar.

En aquella época se conocía el hecho de que en la ciudad de Asuán, situada al sur de Alejandría sobre su mismo meridiano, un día del año, en el solsticio de verano, se veía la imagen del Sol reflejada en el agua de un pozo profundo. Esto quería decir que los rayos solares coincidían en ese momento con la vertical del lugar (ver Figura 2), y el ángulo medido en Alejandría a la misma

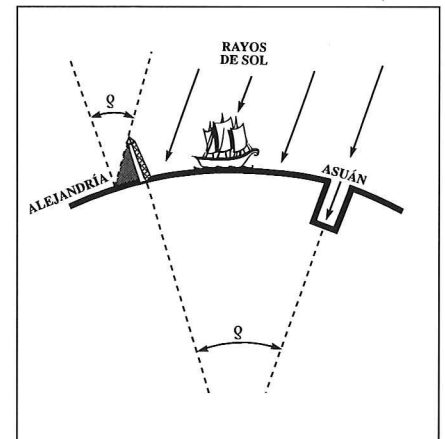


Figura 2.

hora era, precisamente, el ángulo ρ correspondiente al arco Alejandría-Asuán.

Este ángulo fue determinado midiendo la longitud L de la sombra de un obelisco de altura H conocida ($\text{tg } \rho = L/H$) y resultó ser de $7,2^\circ$.

La distancia Alejandría-Asuán fue calculada midiendo el tiempo que tardaban unos soldados en cubrirla. Los datos que quedan de la época indican que su valor era de 5.000 estadios, una unidad de medida que, desgraciadamente para nuestra historia, no sabemos exactamente a qué corresponde en metros. Si se tratase del estadio egipcio, que vale 157,5 m, resultaría un valor para el radio de la Tierra de $R = 6.267$ km extraordinariamente próximo al admitido actualmente: $R = 6.378$ km. Pero si el estadio a que se refiere Eratóstenes fuera el griego,