



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID

Proyecto de Innovación

Convocatoria 2017/2018

Nº de proyecto: **85**

Título del proyecto:

**NUEVOS RECURSOS AUDIOVISUALES PARA LA ENSEÑANZA DE
LA CRISTALOGRAFÍA: CRISTALES Y DIFRACCIÓN EN VIDEOCLIPS**

Nombre del responsable del proyecto: **Carlos M. Pina**

Centro: **Facultad de Ciencias Geológicas**

Departamento: **Mineralogía y Petrología**

1. Objetivos propuestos en la presentación del proyecto

El proyecto *NUEVOS RECURSOS AUDIOVISUALES PARA LA ENSEÑANZA DE LA CRISTALOGRAFÍA: CRISTALES Y DIFRACCIÓN EN VIDEOCLIPS* tenía como finalidad la realización de una serie de videoclips que explicaran el concepto, el descubrimiento y las aplicaciones de la difracción de rayos X, electrones y neutrones empleando cristales. Para ello, en el documento de presentación de dicho proyecto se propusieron los siguientes objetivos:

1.1- Selección de los temas. En un principio se propuso realizar tres videoclips sobre difracción con los siguientes títulos: (i) Cristales y difracción: el descubrimiento, (ii) Determinando las dimensiones de las estructuras cristalinas: la ecuación de Bragg y (iii) Construyendo-dilucidando estructuras cristalinas y entendiendo sus propiedades. Este último videoclip abordaría la descripción estructural, a través de poliedros, de estructuras sencillas (AX, AX₂, ABX₃) que permitan predecir y explicar sus propiedades fisicoquímicas y los patrones de difracción que producen. Seguidamente y, una vez evaluado el resultado de estos tres videoclips iniciales, se realizarían más videoclips sobre temas con contenidos cada vez más complejos como, por ejemplo, la difracción de electrones y la determinación de estructuras cristalinas de complejidad creciente (desde sales simples hasta moléculas biológicas, como el ADN o las proteínas)

1.2.- Producción. Una vez pensados y redactados los contenidos de los videoclips se procedería a recopilar información y a hacer las grabaciones necesarias para los montajes finales.

1.3.- Redacción de los folletos explicativos. Estaba previsto que todos los videoclips realizados fueran acompañados de un folleto explicativo con los contenidos más importantes, una selección de fotogramas y un cuestionario con ejercicios sobre su contenido. Los folletos contendrían, además, los títulos de crédito con mención de las personas y entidades que han contribuido a la realización de los videoclips.

2. Objetivos alcanzados

La realización de este proyecto ha permitido alcanzar los objetivos propuestos, una vez adaptados al presupuesto concedido, que resultó ser algo más bajo que el solicitado. A continuación, se describen dichos objetivos alcanzados:

2.1. Guiones y textos explicativos para los videoclips documentales: Durante el desarrollo del proyecto se han escrito dos guiones para dos videoclips de unos 10 minutos de duración cada uno y otro para un videoclip de unos 5 minutos. Además, se han preparado textos de presentación de los videos, así como un cuestionario resuelto para ser utilizado con fines docentes (**ver anexo I**).

2.2. Grabaciones y otros materiales audiovisuales: Para la realización de los videoclips se han realizado una serie de grabaciones y fotografías en las que aparecen detalles de dispositivos experimentales montados por miembros del equipo encargado del proyecto (**Figura 1**). Además, hemos recopilado una gran cantidad de imágenes, algunas realizadas por miembros del equipo y otras encontradas en internet. Sólo una parte de este material ha sido utilizado para la producción de los videoclips, habiéndose archivado el resto para futuras producciones. Finalmente, algunos miembros del equipo han realizado grabaciones de interpretaciones de piezas musicales que han sido parcialmente incluidas en los videoclips.



Figura 1. Montaje de un dispositivo experimental para generar patrones de difracción periódicos como los que se muestran en los videoclips

2.3. Montaje y producción de los videoclips: La parte más laboriosa del proyecto ha consistido en la edición, montaje y producción de los videoclips que se ha realizado utilizando los programas informáticos Sony Vegas Pro 12 y Kdenlive (**Figura 2**). Para el montaje, fue necesario llevar a cabo una sincronización precisa de las secuencias de imágenes con las grabaciones de voz, los textos y la música, un proceso

que requirió varias horas de trabajo. En total, nuestro equipo ha producido tres videoclips completos, dos de los cuales han sido ya editados en su versión final e incluyen textos explicativos adicionales (**Figura 3**)

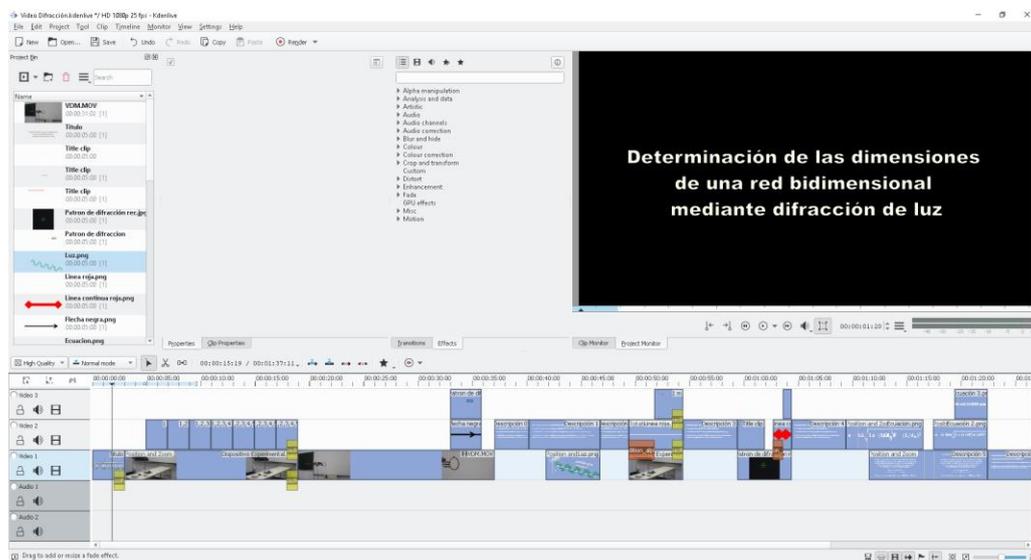


Figura 2. Proceso de edición, montaje y producción de videoclips mediante el programa Kdenlive.



Figura 3. DVD del videoclip *Cristales y Difracción. El descubrimiento*. El DVD incluye un folleto explicativo y un cuestionario sobre los contenidos del videoclip.

2.4. Difusión de los videoclips: Una vez producidos los videoclips se procedió a su difusión empleando distintos medios. El primer videoclip *Cristales y Difracción. El descubrimiento* (<https://www.youtube.com/watch?v=Ep1I6Y48p1c>) fue presentado a profesores y alumnos de la Facultad de Ciencias Geológicas (UCM), el cual tuvo una muy buena acogida. Este videoclip fue posteriormente subido al canal de Youtube Ciencia a

Martillazos y enviado a colegas del departamento Geología de la Universidad de Oviedo, del Departament de Cristal·lografia, Mineralogia i Dipòsits Minerals de la Universitat de Barcelona. Por otro lado, el videoclip fue enviado para su difusión a la biblioteca de la Facultad de Ciencias Geológicas (UCM) y los Centros de Apoyo a la Investigación (CAI) de Difracción de Rayos-X, Microscopia Electrónica y Técnicas Geológicas. Una versión corta del videoclip *Cristales y Difracción. El descubrimiento* (de 5 minutos) se presentó al concurso VIII Concurso de Divulgación Científica UCM.

3. Metodología empleada en el proyecto

La metodología para la realización de este proyecto se ha ajustado a la propuesta en el documento de su solicitud y ha consistido en las siguientes tareas:

Tarea 1. Discusión y redacción de guiones para los videoclips. Una vez redactados, estos guiones fueron posteriormente leídos y grabados por miembros del grupo solicitante.

Tarea 2. Recopilación de material audiovisual (dibujos, pinturas, fotografías, y música) disponible en libros e internet (libres de derechos) y realizadas por algunos miembros del equipo.

Tarea 3. Realización de algunas grabaciones en las que aparecen algunos miembros del equipo explicando el funcionamiento de dispositivos experimentales o algunos conceptos en lugares concretos (aulas, laboratorios, entornos urbanos y naturales etc.). Estas grabaciones se hicieron con una cámara reflex Canon EOS 700D, adquirida gracias a la financiación asignada al proyecto. Una serie de grabaciones adicionales se hicieron empleando un microscopio Nikon Eclipse Ci POL, equipado con una cámara de grabación. Este microscopio está disponible en el Departamento de Mineralogía y Petrología de la Facultad de Ciencias Geológicas de la UCM.

Tarea 4. Montaje de los videoclips en su forma final. Esta una de las tareas más importantes y laboriosas del proyecto, pues implicó llevar a cabo una combinación adecuada del texto leído, las imágenes, las grabaciones realizadas y la música. El montaje de las distintas partes de los videos se hizo con los programas Sony Vegas Pro 12 y Kdenlive.

Tarea 5. Elaboración de DVDs y folletos explicativos que acompañan a los videoclips. Los folletos contienen información básica sobre el contenido de cada uno de los vídeos e incluyen algunos fotogramas ilustrativos, un cuestionario con ejercicios, información técnica sobre su realización y los títulos de crédito. Difusión de los vídeos a través del canal de Youtube titulado “Ciencia a martillazos” y el Campus Virtual de la UCM.

4. Recursos humanos

El grupo dedicado a realizar este proyecto ha estado integrado por:

Dos profesores del Departamento de Mineralogía y Petrología de la Facultad de Ciencias Geológicas:

El Dr. Carlos Manuel Pina imparte asignaturas de Cristalografía en la Facultad de Ciencias Geológicas y ha sido supervisor del proyecto “Construcción de las 14 redes de Bravais” Realizado por el alumno de Cristalografía de primer curso de Grado en Geología Wenrong Peng (2016). También ha sido miembro del PIMCD 12, 2015. La Dra. Victoria López-Acevedo también imparte asignaturas de Cristalografía en las Facultad de Ciencias Geológicas y Ciencias Químicas y ha participado en los siguientes proyectos de innovación docente: PIMCD 12-2015; 7-PIMCD; PIMCD 77-2016; PIMCD 62-2014; PIMCD 66-2014; PIMCD 352-2014; PIMCD 218-2014; PIMCD 21, 2013; PIMCD 74, 2011; PIMCD 19, 2009.

Dos profesores y un investigador predoctoral de la facultad de Ciencias Químicas:

El Dr. Carlos Otero y el Dr. David Ávila imparten las asignaturas de Química Inorgánica I y II del Grado de Química en la Facultad de Químicas. Además, imparten los laboratorios de difracción de rayos X de la asignatura Estructura, Defectos y Caracterización de Materiales de segundo curso del Grado en Ingeniería de Materiales. El Dr. Carlos Otero imparte cursos sobre la Difracción de Electrones (de Máster y Posgrado desde 1990. Ambos han participado en el proyecto PIMCD 12; 2015: Modelos de redes cristalográficas. D. Daniel Arenas Esteban es investigador predoctoral en el Departamento de Química Inorgánica I. Colabora en la docencia impartiendo prácticas de la asignatura Informática Aplicada en Química de primer curso del Grado en Química.

Un experto en la realización de documentales:

El Dr. Miguel Toja Aguirre es Dr. en Biología y diplomado en Magisterio con amplia experiencia en el manejo de programas informáticos para la realización de vídeos divulgativos. Ha sido organizador de seminarios y cursos de divulgación en la Universidad de Zaragoza entre 1999 - 2003.

Un profesor-investigador en formación y un colaborador honorífico del Departamento de Mineralogía y Petrología.

El Dr. Carlos Pimentel Guerra es doctor en Geología por la UCM. Como becario FPU ha participado en las prácticas de Cristalografía de primero de Grado en Geología, de la asignatura de Cristalografía y Mineralogía de primero de Grado de Ingeniería Geológica y de la asignatura Geología para Químicos en la Facultad de Químicas. El Dr. Pimentel tiene gran experiencia en la utilización de programas específicos de tratamiento de imágenes y realización de fotos y vídeos científicos. D. Ángel Crespo López ha sido alumno del Máster de Procesos y Recursos Geológicos y actualmente es estudiante de doctorado y colaborador honorífico del Departamento de Mineralogía y

Petrología de la Facultad de Ciencias Geológicas. Ambos participaron también en el proyecto PIMCD 12, 2015: Modelos de redes cristalográficas.

5. Desarrollo de las actividades

Actividades realizadas: durante del desarrollo del proyecto se llevaron a cabo una serie de actividades relacionadas con la difusión de los videoclips, las cuales están resultando muy exitosas. Así, el primer videoclip (*Cristales y difracción. El descubrimiento*), subido al nuevo canal de Youtube *Ciencia a martillazos* (<https://www.youtube.com/watch?v=Ep1I6Y48p1c>), ya cuenta con más de 630 visitas y el canal con 34 seguidores. Por otro lado, este videoclip fue mostrado por primera vez en una sesión especial a profesores del Departamento de Cristalografía y Mineralogía (Departamento de Mineralogía y Petrología después de la fusión). El videoclip ha sido también proyectado el pasado año en clase para que pudieran verlo los alumnos de los dos grupos de la asignatura Cristalografía del grado en Geología, impartido en la facultad de Ciencias Geológicas. Después de las proyecciones, los alumnos rellenaron un cuestionario sobre el contenido del videoclip que fue utilizado como parte de la evaluación de la asignatura.

Actividades futuras: En el futuro se continuará con la labor de difusión de nuestros videoclips en facultades, museos, instituciones científicas y otros centros educativos. Además, se terminarán de producir algunos videoclips, para los que el equipo del proyecto cuenta ya con abundante material. Entre los videoclips que próximamente serán subidos al canal de Youtube *Ciencia a martillazos* están los que llevarán por título: *Determinación de una red bidimensional mediante difracción de luz* y *Cristales y difracción. La ecuación de Bragg*. Las actividades futuras también comprenden la realización de nuevos videoclips sobre otros temas de Cristalografía. Así, en los próximos meses está previsto producir videoclips en los que se explicará cómo se construyen las 14 redes cristalinas tridimensionales (redes de Bravais) y grabaciones en las que se muestran el crecimiento de cristales observado con un microscopio petrográfico. Para proseguir con nuestra actividad divulgativa dentro del ámbito de la Cristalografía, nuestro equipo presentó recientemente el proyecto de continuación titulado *Cristales, cristalización y difracción: nuevo material audiovisual para la enseñanza de la Cristalografía*, el cual ha sido aprobado sin financiación en la última convocatoria Innova-Docencia (proyecto nº118).

Anexo I.

Guión ilustrado y cuestionario para el videoclip *Cristales y difracción. El descubrimiento.*

Hoy en día sabemos que los cristales son una forma de organización de la materia consistente en la repetición periódica tridimensional de átomos. A estos átomos que se repiten se les denomina motivo y a esa pauta de repetición red cristalina (fig. 1).

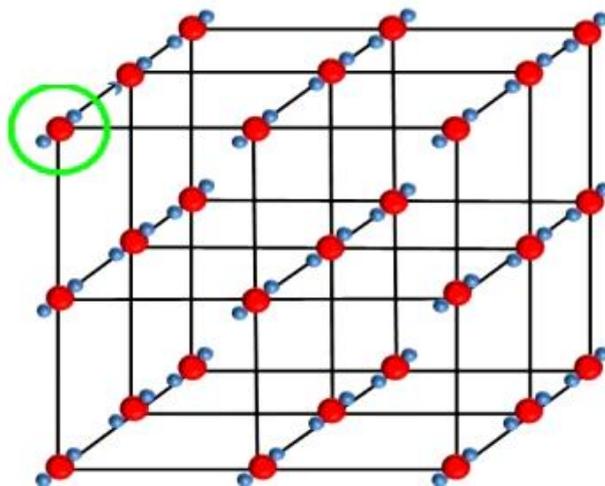


Figura 1. Cristal = motivo \times red.

Por ejemplo, los cristales de la sal común o cloruro sódico están formados por la repetición de millones de átomos de cloro y de sodio, dispuestos según una red cúbica.

Los primeros indicios de la estructura reticular de los cristales se obtuvieron ya en el siglo XVIII tras observar y medir sus formas externas, las cuales presentan simetrías solamente compatibles con la repetición periódica de átomos (fig. 2).

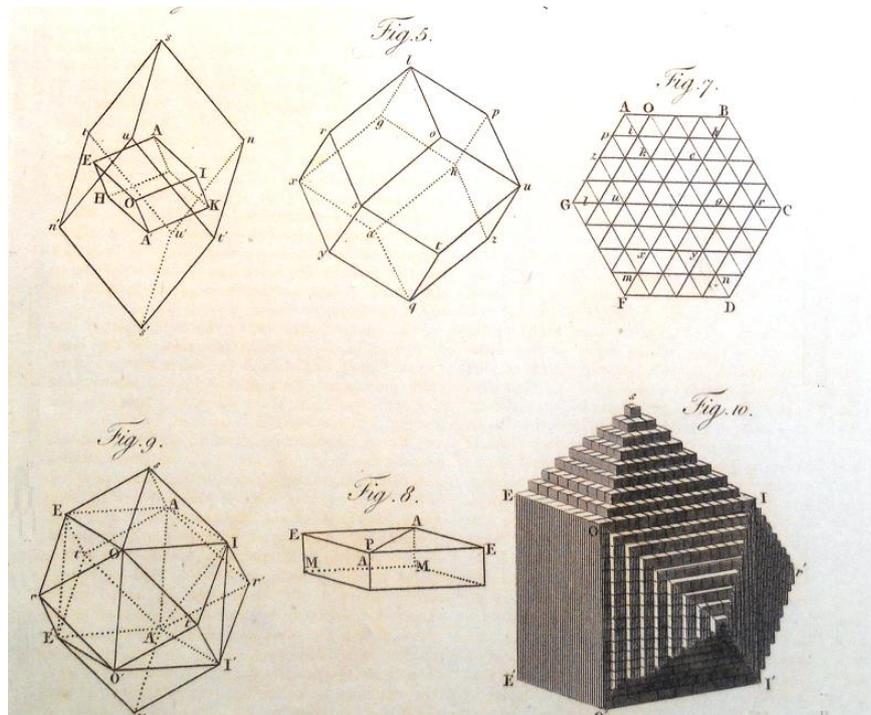


Figura 2. Ilustración de la teoría reticular de las estructuras cristalinas según Haüy (grabado de principios del s. XIX).

Sin embargo, la demostración experimental de esta naturaleza periódica no tuvo lugar hasta comienzos del siglo XX, cuando los intereses de los cristalógrafos se cruzaron con los de los científicos interesados por la radiación.

Cuando una red es atravesada por una radiación cuya longitud de onda es similar a sus dimensiones, se produce el fenómeno conocido como difracción.

Por ejemplo, si cogemos una malla cuyos hilos tengan una separación de unas pocas micras y hacemos pasar a través de ella un láser de una longitud de onda de una media micra, observaremos en la pared un patrón regular de puntos luminosos cuyas distancias se relacionan con las dimensiones de la malla. El punto central corresponde al haz de luz de láser que no se ha desviado por la malla, mientras que el resto de los puntos corresponde a los haces que sí han sido desviados por ella (fig. 3).

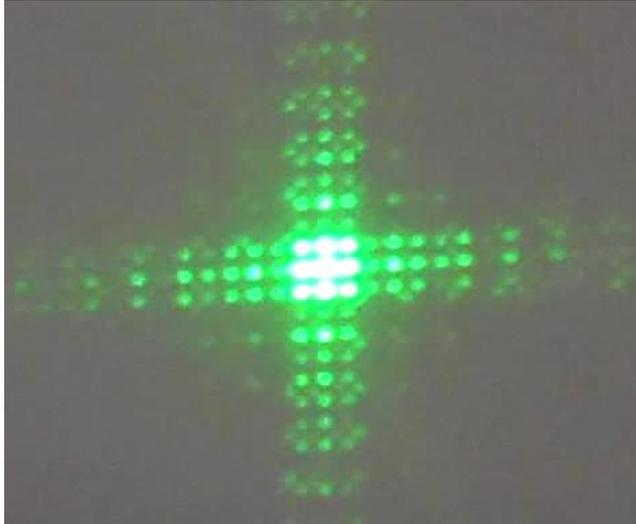


Figura 3. Patrón de difracción generado cuando un láser verde atraviesa una malla.

Sin embargo, para determinar las dimensiones de una red cristalina hace falta una radiación con una longitud de onda mucho más pequeña que la de la luz.

En 1895, Wilhelm Conrad Röntgen, mientras experimentaba con tubo de rayos catódicos, descubrió una extraña radiación capaz de atravesar los sólidos a la que denominó Rayos X (fig. 4).

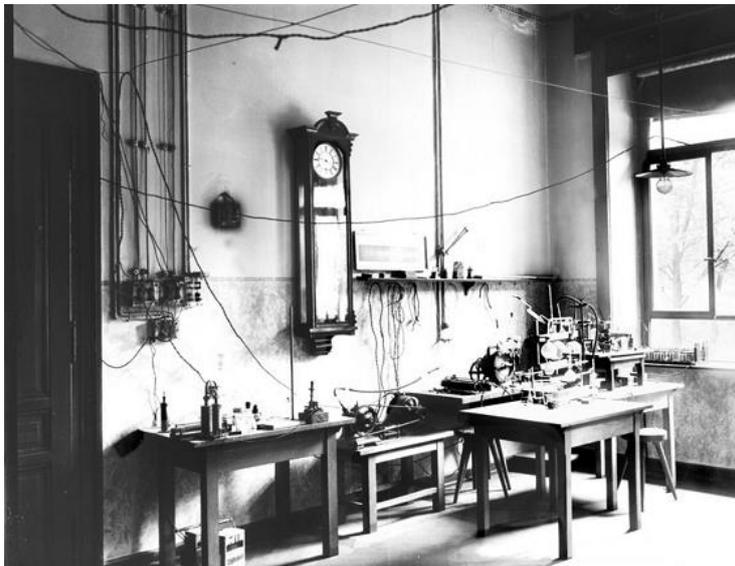


Figura 4. Laboratorio de W.C. Röntgen en Würzburg (1895).

El gran poder penetrante de los rayos X, evidenciado en numerosas y peligrosas demostraciones, claramente indicaba que se trataba de una radiación con una longitud de onda mucho menor que la de la luz (fig. 5).

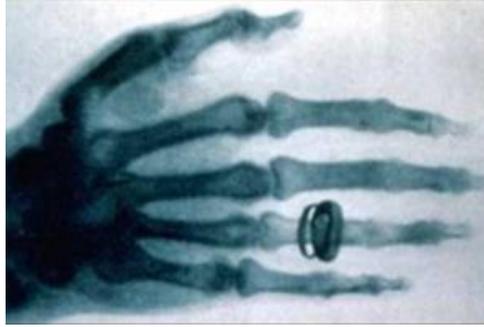


Figura 5. Radiografía de la mano de Albert von Kölliker (W. C. Röntgen, 1896).

En 1900, Röntgen fue nombrado catedrático de Física y se trasladó a la Universidad de Múnich, donde coincidió con Arnold Sommerfeld y su asistente Max von Laue, uno de los discípulos del eminente físico Max Planck.

Uno de los principales intereses de este grupo de físicos era confirmar la naturaleza ondulatoria de los rayos X mediante la determinación de su longitud de onda. La manera más directa de hacer esto consistía en hacer pasar la radiación X por rejillas con dimensiones similares a las de su longitud de onda y después analizar los patrones de difracción obtenidos. El principal problema que esto entrañaba era que, si la longitud de onda de los rayos X era tan pequeña como ellos sospechaban, era imposible fabricar rejillas de dimensiones tan reducidas como para producir tal difracción (fig. 6).

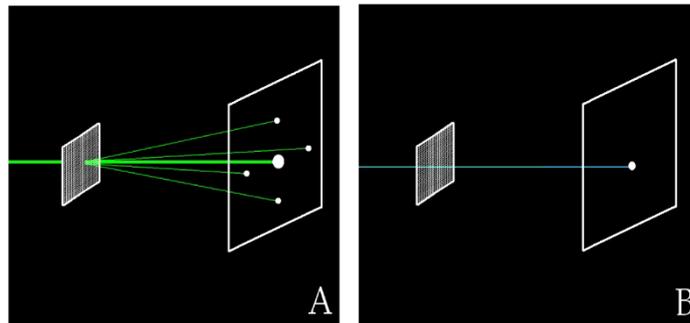


Figura 6. A: esquema de generación de un patrón de difracción cuando una radiación atraviesa una malla con dimensiones similares a su longitud de onda. B: ausencia de patrón de difracción cuando la longitud de onda de la radiación es muy diferente de las dimensiones de la malla.

Así estaban las cosas cuando en 1912, Paul Peter Ewald acabó su tesis sobre interferencia de la luz con los cristales. En un paseo por el Englischer Garten de Múnich poco antes de la defensa de su tesis, Ewald comentó algunos aspectos de su trabajo a Laue y éste comenzó a considerar la posibilidad de utilizar cristales como rejillas de difracción para los rayos X.

Esta idea fue discutida entre los colegas de Laue sin llegar a un acuerdo. Mientras algunos, como el mismo Laue, estaban convencidos de que al atravesar un cristal con rayos X se generaría un patrón de difracción, otros, como Sommerfeld, afirmaban que la vibración térmica de los átomos en el interior de su estructura lo impediría.

Laue no se resistió a la tentación de hacer un experimento casi clandestino. Para ello, encargó al asistente de Sommerfeld, Walter Friedrich y al estudiante de doctorado Paul Knipping que prepararan un dispositivo experimental para que un haz de rayos X incidiera sobre un cristal y, una vez atravesado éste, impresionara una placa fotográfica situada detrás (fig.7).

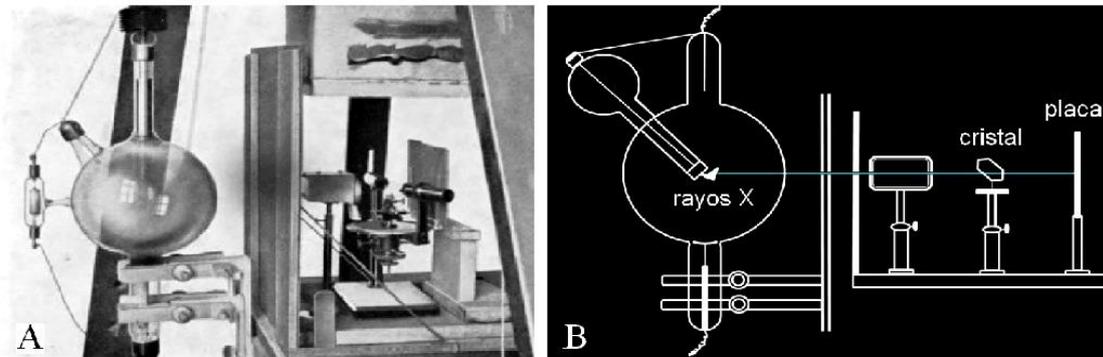


Figura 7. A: reconstrucción del dispositivo experimental diseñado por Friedrich y Knipping. B: esquema explicativo del experimento propuesto por Laue.

Después de un par de intentos, Friedrich y Knipping consiguieron una fotografía en la que se podía ver una impresión central debida al haz de rayos X directo y una serie de puntos distribuidos a su alrededor que correspondían a los rayos difractados por el cristal. Cuando el resultado del experimento fue comunicado a Laue, éste corrió al laboratorio y, convencido del hallazgo, escribió sobre la fotografía: "Primera difracción de rayos X por un cristal" y la firmó (fig.8).

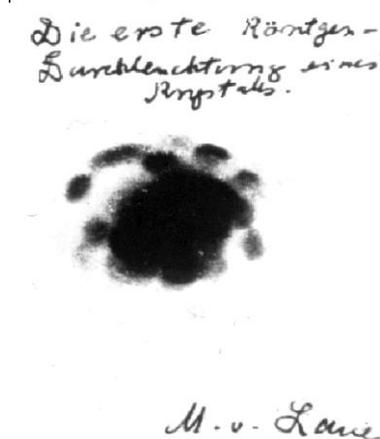


Figura 8. Imagen de la primera difracción de rayos X por un cristal firmada por Max von Laue.

El experimento había demostrado claramente dos hechos: que los rayos X eran ondas electromagnéticas con una longitud de onda muy pequeña y que los cristales consistían en un ordenamiento interno de átomos que se podía describir mediante redes tridimensionales.

El experimento de Laue, en palabras de Albert Einstein es "uno de los experimentos más bellos de la Física" y abrió la puerta a un nuevo campo de la investigación cristalográfica. A partir de ahora se iba a contar con una poderosa

herramienta que permitiría conocer la estructura de los cristales y que iba a mejorar radicalmente nuestro conocimiento sobre la materia.

Sin embargo, para ello fue necesario aprender cómo se relaciona el fenómeno de la difracción con la disposición de los átomos dentro de los cristales, trabajo éste que Laue y otros investigadores comenzaron a abordar inmediatamente.

CUESTIONARIO

- 1.- ¿Qué hizo suponer a los científicos que las estructuras de los cristales tenían un orden periódico?
- 2.- ¿Qué es un patrón de difracción?
- 3.- ¿Qué es lo que permitió demostrar la hipótesis de que los cristales consisten en repeticiones periódicas de átomos?
- 4.- ¿Por qué los cristales no pueden difractar la luz visible?
- 5.- ¿Qué dos hechos fundamentales demostró el experimento de Laue?
- 6.- ¿Qué permite el análisis de los patrones de difracción por cristales?

RESPUESTAS AL CUESTIONARIO

- 1.- Durante el siglo XVIII, científicos como Romé de l'Isle o Haüy dedicaron un gran esfuerzo a describir las formas que presentaban los cristales de los minerales conocidos y a medir los ángulos entre las caras de dichos cristales. Cuando tuvieron un suficiente número de descripciones y mediciones, llegaron a la conclusión de que aquellas sólo se podían explicar si se asumía que los cristales estaban formados por una disposición periódica tridimensional de celdas unitarias (o moléculas integrantes en palabras de Haüy) que contenían los átomos de materia.
- 2.- Un patrón de difracción es una distribución regular de puntos que se genera cuando una onda atraviesa e interfiere con una rendija con unas dimensiones similares a la longitud de dicha onda.
- 3.- La hipótesis de que los cristales consisten en repeticiones periódicas de átomos pudo demostrarse gracias al descubrimiento de los rayos X, una radiación cuya longitud de onda es similar a la separación de los átomos dentro de los cristales, lo cual permitió obtener patrones de difracción con una periodicidad que refleja la periodicidad cristalina.
- 4.- Los cristales no pueden difractar la luz visible porque las dimensiones de las redes cristalinas son varios órdenes de magnitud menores que la longitud de onda de la luz.
- 5.- El experimento de Laue demostró: (i) que la disposición de los átomos dentro de los cristales era periódica y podía describirse mediante redes tridimensionales y (ii) que los rayos X tenían una naturaleza ondulatoria.
- 6.- El análisis de los patrones de difracción producidos por cristales permite medir las dimensiones de las redes cristalinas y determinar las posiciones de los átomos dentro de sus estructuras.

CRÉDITOS

Texto original
Carlos M. Pina

Adaptación
Carlos M. Pina y Miguel Toja

Locución
Miguel Toja

Fotografías originales

Fluorita, vanadinita y piritita
Ángel Crespo López

Calcita, piritita y cuarzo
Carlos M. Pina

Cobaltina
Victoria López-Acevedo

Cristales de NaCl en solución acuosa
Carlos Pimentel y Carlos M. Pina

Cristales de NaCl observados con un microscopio electrónico de barrido
Ana Vicente Montaña
Centro Nacional de Microscopía Electrónica, UCM
Tubo de rayos catódicos
Museo de la Geología de la UCM
Directora: Victoria López-Acevedo

Grabados, cuadros y dibujos

Grabados del libro "Atlas de Crystallographie" de Rome de l'Isle (1783)
Colección de Carlos M. Pina

Reproducción del modelo de Haüy en "Pantologia" de John Good (1809)
Colección de Carlos M. Pina

Dibujos explicativos del Museo de la Geología de la UCM
Directora: Victoria López-Acevedo

Grabado sobre las primeras aplicaciones de los rayos X (ca. 1910)
<http://manuelhumanidades.blogspot.com.es>

Blick auf den Marienplatz in München
Óleo sobre lienzo 70 x 60 cm
C. Vetter (1912)
<https://commons.wikimedia.org>

The Amalienstraße around 1900
Postal anónima.

<https://en.wikipedia.org>

Acuarela Englischer Garten (2017)
Carlos M. Pina

Diagrama de la patente de Laue (1912)
<http://www.treccani.it>

Ewald con resonadores (2017)
Miguel Toja

Fantasia con Ewald y Laue (2017)
Miguel Toja

Físicos sobre la pizarra (2017)
Miguel Toja

Rejillas y difracción (2017)
Miguel Toja y Carlos M. Pina

Fotografías históricas

Retrato de Röntgen (1915)
Berliner Illustrierte Zeitung
<https://es.wikipedia.org>

Laboratorium von W.C. Röntgen (1895-1900)
<https://commons.wikimedia.org>

Early x- Ray images by Röntgen (1896-1900)
<https://www.nde-ed.org/EducationResources/>

Radiografía de la mano de Albert von Kölliker
W. C. Röntgen (1896)
<https://es.wikipedia.org>

Free x ray examination of patients (1900)
<http://www.medicinaintensiva.com>

Early x- Ray images by Röntgen (1896-1900)
<https://www.nde-ed.org/EducationResources>

Arnold Sommerferld ca. 1900
<http://rabfis15.uco.es/modelos Atómicos.NET>

Retrato en Suecia de Max Von Laue (1914)
<https://es.wikipedia.org>

Foto del dispositivo experimental de Friedrich y Knipping
<http://www.treccani.it>

Lauegramas y Difractogramas

Foto del Experimento de Laue firmada por él mismo (1912) y Lauegrama de la Blenda (1912) en:

Laue, Max von; Friedrich, Walter & Knipping, Paul: Eine Quantitative Prüfung der Theorie für die Interferenz-Erscheinungen bei Röntgenstrahlen. Sitzungsber. K. Bayer. Akad. Wiss. pp. 363-373

X-ray diffraction image of the double helix structure of the DNA molecule (1952)

Raymond Gosling & Rosalind Franklin en:

<https://en.wikipedia.org>

X ray diffraction photograph on a single crystal of sperm whale myoglobin

<https://www3.nd.edu>

Rock Salt X- ray diffraction (1913)

W. L. Bragg, Proc. R. Soc. Lond. 89 248-277

<http://rspa.royalsocietypublishing.org>

Estructuras cristalográficas

Modelos tridimensionales de cristales de halita, piritita y blenda obtenidos

Crystalmaker Software Ltd. Licenced to Carlos M. Pina (UCM) S.N: 3226

DNA-fragment-3D-vdW (2006) por Benjah-bmm27 en:

<https://en.wikipedia.org>

Myoglobin 3D structure (2008) por AzaToth en:

<https://es.wikipedia.org>

Música

Piano Sonata, Op. 1 (1910)

Alban Berg

Interpretado por Jonathan Biss en:

<https://musopen.org>

Sonatas en trio Oeuvre III (1712)

J.M. Hotteterre

Interpretadas por Carlos M. Pina (violín), Miguel Toja (flauta) y Elena Pina (clave)

Cuarteto de cuerda nº. 4, Sz.91 (1922)

Béla Bartók

Interpretado por Le Quator Guillet: Daniel Guilet, Jac Gorodetsky (1º y 2º violin) Frank

Brieff (viola) Lucien Kirch Laporte (chelo) en:

<http://imslp.org>

Daphnis et Chloé (1909)

Maurice Ravel

Interpretada por DuPage Symphony Orchestra en

<https://musopen.org>

Todos los materiales aquí referidos han sido utilizados respetando las indicaciones y derechos que se explican en sus fuentes de origen.

LECTURAS RECOMENDADAS

AMORÓS, J.L. (1978) La gran aventura del cristal. Naturaleza y evolución de la ciencia de los cristales. Editorial de la Universidad Complutense de Madrid. ISBN 84-7491-000-5

AMORÓS, J.L. (2017) La gran aventura del cristal. Edición corregida y aumentada. Editora: Victoria-López Acevedo. Editorial Complutense. ISBN 978-84-669-3539-5

AUTHIER, A. (2013) Early Days of X-ray Crystallography. Oxford University Press. ISBN: 9780199659845

PINA, C.M. (2014) Los fundamentos de la Cristalografía: una reseña histórica. Anales de Química 110, 294-302