

La cristalografía en el cine

Laura Torre-Fernández, Santiago García-Granda

Resumen: Con frecuencia, la cristalografía es presentada a los alumnos como una herramienta de análisis formando parte de otras ciencias o disciplinas. Esto hace que vaya perdiendo su identidad como ciencia. Utilizando el cine y la televisión como herramientas divulgativas introduciremos la cristalografía como una ciencia en sí misma, a la vez que los difíciles conceptos, complejos y abstractos, en los que se basa, de un modo ameno a la vez que riguroso.

Palabras clave: Cristalografía, divulgación científica, cine, televisión.

Abstract: Crystallography is often introduced to students as a tool for analysis embedded within the framework of other sciences or disciplines. This makes Crystallography losing in some way, its identity as science. By using cinema and television as outreach tools we introduce Crystallography as an independent science itself, in spite of the complex and abstract concepts in which is based, in an entertaining as well as rigorous way.

Keywords: Crystallography, scientific outreach, cinema, television.

Introducción

La cristalografía es una ciencia multidisciplinar basada en unos principios y conceptos complejos y abstractos difíciles de entender por los estudiantes. Esta dificultad se acrecienta cuando, a veces, se introduce integrada como parte de otras ciencias, como química, biología, geología, física o ciencia de materiales, y no como una ciencia en sí misma. Tal y como presentamos en un trabajo anterior, el cine y la televisión nos resultaron muy útiles para introducir la química¹ en el aula por lo que utilizamos una aproximación similar para introducir la cristalografía, con la esperanza de crear cultura científica y vocaciones científicas y tecnológicas, obteniendo nuevamente resultados satisfactorios.

La divulgación de la cristalografía

Según la Real Academia Española, se puede definir la divulgación como la acción de poner al alcance del público algo. En ciencia, ese algo, serán conceptos y principios, en la mayoría de los casos, complicados de entender y que se presentarán de una forma amena y sencilla. Podemos encontrar divulgadores en prácticamente todos los campos científicos y, en el caso de la cristalografía, ha visto la luz hace sólo

unos pocos años pero, a pesar de ello, ha conseguido sus objetivos de mostrarla como una ciencia en sí misma y no como una herramienta de otras ciencias. El año 2014 es el *Año Internacional de la Cristalografía*, es por tanto una gran oportunidad de lograr el reconocimiento de la cristalografía como ciencia central en la descripción de la materia.

En la página web de la Unión Internacional de cristalografía² (IUCr) podemos encontrar un apartado dedicado a la divulgación³ con gran cantidad de ejemplos dedicados a cada uno de sus campos de estudio, origen, crecimiento, estructura, composición y propiedades físicas de los cristales. También existen gran cantidad de escuelas y cursos repartidos por todo el mundo que nos acercan a los conceptos de esta ciencia, por ejemplo, algunos de los cursos más conocidos son la *Escuela de Erice*⁴ o la *Escuela de Cristalografía de Zürich*.⁵ Además, en todos los congresos tanto europeos como internacionales, podemos encontrar un microsímposio dedicado a la presentación de diferentes técnicas de comunicación y avances en divulgación.

Los grupos de investigación españoles llevan a cabo una gran labor en este campo y muchos de los trabajos desarrollados son conocidos tanto a nivel nacional como internacional. Podemos destacar el sitio web desarrollado por Martín Martínez Ripoll, Félix Hernández Cano y su grupo de trabajo, que fue seleccionado como “*uno de los sitios web de interés para el aprendizaje y educación en cristalografía*”.⁶ La utilidad de esta página web quedará bien probada a lo largo de este artículo ya que será referenciada en varias ocasiones. También podemos destacar el *Bilbao Crystallographic Server*,⁷ donde podemos encontrar gran cantidad de aplicaciones *on line* muy útiles.

En lo que a cursos se refiere, tradicionalmente en España se organizan varios a lo largo del año, entre los que hay que destacar la *Escuela sobre el Método Rietveld*,⁸ y el más conocido, *Máster en Cristalografía y Cristalización*.⁹ Este máster está organizado por la *Factoría de Cristalización*,¹⁰ que es un proyecto *Consolider* en el que participan grupos de investigación de toda España, el *Laboratorio de Estudios Cristalográficos* de Granada, el *Grupo de Química Inorgánica* de la Universidad de Alcalá, el *Grupo*



L. Torre-Fernández



S. García-Granda

Facultad de Química, Universidad de Oviedo
Julián Clavería, 8, 33006. Oviedo
C-e: torrelaura.uniovi@gmail.com, sgg@uniovi.es

Recibido: 14/11/2013. Aceptado: 27/02/2014.

de Análisis Estructural del Instituto de Ciencia de los Materiales de Aragón, el Laboratorio de Biología Estructural de las Proteasas y Resistencia Antibiótica de Barcelona, el Grupo Consolidado de Cristalografía de la Universidad de Barcelona, el Laboratorio de Rayos X y Materiales Moleculares de la Universidad de la Laguna, el Laboratorio de Cristalografía de la ICMM de Madrid, el Grupo de Cristalografía Macromolecular y Biología Estructural del Instituto de Química-Física Rocasolano, y nuestro grupo de investigación, el Equipo de Rayos X, dentro del grupo SYSTAM¹¹ de la Universidad de Oviedo.

En el caso de actividades, a nivel nacional se organiza el Concurso de Cristalización en la Escuela¹² y el Campus Científicos de Verano,¹³ en el que la Universidad de Oviedo participa con un proyecto titulado Bases Científicas de las Investigaciones Criminalísticas (CSI), en el que se hace uso de varios conceptos cristalográficos. La Universidad de Oviedo, además de participar en la organización de estos dos proyectos, organiza y participa en otras actividades a través de la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI).¹⁴ Uno de esos proyectos es la Semana de la Ciencia y la Tecnología,¹⁵ que es una iniciativa de ámbito europeo al que la Universidad de Oviedo se unió en 2001, y en el que la cristalografía está presente dentro del taller Luz y Color que, a su vez, es una de las partes del taller Experimentos Científicos: La Ciencia en Casa y, desde 2011, en el taller La Ciencia en el Cine: Ficción o realidad, donde el cine y la televisión son utilizadas como herramientas educativas. La primera vez que utilizamos estas herramientas fue en 2010 en el taller La Química en el Cine: Ficción o Realidad, presentado en la Semana de la Ciencia y la Tecnología y en el Campus Científicos de Verano 2010. Los resultados de estos talleres fueron muy satisfactorios, dando lugar a una publicación¹ y a la posibilidad de ir un paso más allá y ampliar el proyecto introduciendo conceptos cristalográficos. La metodología utilizada es la misma que en los casos anteriores, talleres de aproximadamente una hora de duración durante la cual se visionan escenas de películas o series para, a continuación, profundizar en el concepto que se nos presenta en dicha escena. Nuevamente, los resultados de estos talleres fueron excelentes, mostrando los alumnos gran interés por el tema y siendo muy solicitado a partir de entonces, tanto en la Semana de la Ciencia y la Tecnología de años posteriores como en la iniciativa Día de la ciencia en mi colegio. Debido a todo esto, el trabajo fue presentado en The 27th European Crystallographic Meeting,¹⁶ y ahora en este artículo para intentar llevar la información sobre esta metodología y estos experimentos al mayor número posible de personas.

Superman III, The Big Bang Theory, la cristalinidad y las formas alotrópicas del carbono

El concepto de cristalinidad y la diferencia entre cristalino y amorfo pueden presentarse utilizando como apoyo la película Superman III (1983).

Como punto de partida, mostramos a los alumnos una diapositiva con fotos de personas en escenas típicas de la vida cotidiana; por ejemplo, añadiendo azúcar al café o sal a una ensalada, escribiendo con un lápiz, abriendo una ventana, bebiendo un vaso de agua con hielo o poniéndose las gafas,

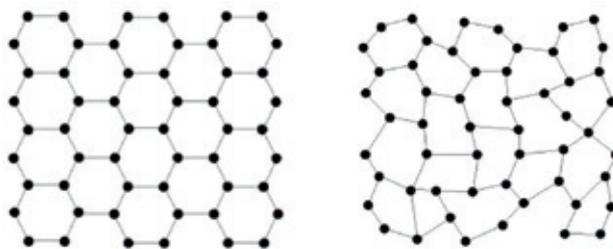


Figura 1. Esquema de un modelo cristalino y un modelo amorfo.

y abrimos un pequeño debate sobre en qué escenas aparecen cristales.

Una vez finalizado el debate les mostramos la escena de la película en la cual Superman llega volando a una mina de carbón, recoge un pedazo de éste y apretándolo con una mano lo transforma en un diamante. Esta escena nos sirve tanto para introducir los conceptos de cristalino y amorfo como para las formas alotrópicas del carbono.

Un cristal es un sólido homogéneo que presenta una estructura interna ordenada de sus partículas reticulares, sean átomos, iones o moléculas. Esos átomos, iones o moléculas serán el modelo que se repetirá periódicamente en las tres dimensiones del espacio. Un sólido amorfo es aquel que no presenta orden en su estructura interna (Figura 1).⁶

Los alótropos^{6,17} son las diferentes formas en que puede existir un elemento, dependiendo de las condiciones y modos en los que se ha formado. Así, se conocen más de 40 formas de carbono, muchas de las cuales son amorfas. Las tres más conocidas son diamante, grafito y carbón. Todas ellas se componen únicamente de carbono diferenciándose en el orden interno (Figura 2).

En el diamante, tenemos un orden interno muy compacto en el que cada átomo de carbono se encuentra unido a otros cuatro. En el grafito, que es el alótropo más estable, los átomos de carbono se encuentran distribuidos formando un sistema policíclico de anillos bencénicos fusionados que se disponen en capas paralelas separadas entre sí 3,35 Å. Por último, el carbón no presenta orden interno y los átomos están distribuidos al azar, de ahí que lo caractericemos como sólido amorfo. Este orden interno es el responsable de la apariencia externa y, a su vez, depende de las condiciones en las que se forma el cristal.

El diamante es incoloro, aislante, y el más denso y duro de los materiales conocidos. Su formación¹⁸ requiere períodos de 1 a 3,3 mil millones de años y se produce en condiciones de presión y temperatura extremas, existentes a profundidades de 140 km a 190 km en el manto terrestre. El grafito es de color negro, presenta conductividad y tiene propiedades

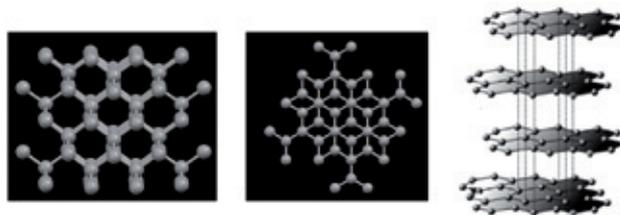


Figura 2. Orden interno de los átomos de carbono en el diamante⁶ a la izquierda y del grafito¹⁹ en el centro y a la derecha.

lubricantes. Su aplicación más conocida es su empleo en las minas de los lápices, pero también permite obtener láminas de un material tan importante tecnológicamente como el grafeno,²⁰ que llevó a Andréy Geim y a Konstantín Novosiólov a ganar el Premio Nobel de Física²¹ en 2010 por sus revolucionarios descubrimientos acerca de este material. Se forma¹⁹ en condiciones de presión atmosférica y temperatura ambiente. El carbón es de color negro y se utiliza como combustible y como reactivo para producir materias primas industriales, como el etino. Se origina²² por la descomposición de vegetales terrestres que se acumulan en zonas pantanosas, lagunares o marinas, de poca profundidad. Se cree que la mayor parte del carbón se formó durante el período carbonífero (hace 280 a 345 millones de años).

Existen varias técnicas para obtener diamantes de forma sintética, HPHT (de inglés *High Pressure High Temperature*) o CVD (de inglés, *Chemical Vapor Deposition*) y, según el Instituto Gemológico Español,²³ han avanzado tanto que, en algunos casos, su identificación solo está al alcance de laboratorios muy especializados. En cualquier caso, a pesar de la dificultad de identificación, sus propiedades aún no consiguen igualar a las de los diamantes naturales. Las condiciones naturales sólo pueden ser alcanzadas por un superhéroe tal y como hemos visto en el fragmento de película que, además de conseguir un diamante, lo obtiene tallado y listo para su venta.

Para complementar toda esta información sobre las formas alotrópicas del carbono, podemos incluir una escena de la exitosa serie *The Big Bang Theory*. En el capítulo 12 de la quinta temporada, titulado “La maniobra del abalorio brillante”, Sheldon Cooper le compra una tiara a su novia, Amy Farrah Fowler. Cuando se encuentran en la joyería y el dependiente le muestra una pulsera de diamantes, la rechaza ya que se niega a despilfarrar miles de dólares sólo porque los átomos de carbono están ordenados, en comparación con el carbón que se puede comprar en el supermercado para encender una barbacoa.

Superman I y los rayos X

Una vez se ha introducido el concepto de cristal, el siguiente paso es introducir la técnica mediante la cual podemos “ver” ese orden interno del que hablamos, la difracción de rayos X. Para ello, podemos utilizar la escena de *Superman I* (1978) en la que el héroe protagonista llega volando a la terraza de Lois Lane y, utilizando su visión de rayos X, comprueba que sus pulmones están libres de cáncer.

Los rayos X^{6,24} son radiaciones electromagnéticas, como lo es la luz visible, o las radiaciones ultravioleta e infrarrojo; invisibles, son capaces de atravesar cuerpos opacos y de imprimir las películas fotográficas. Lo que los distingue de las demás radiaciones electromagnéticas es su llamada longitud de onda, que es del orden de 10^{-10} m. En la Figura 3²⁵ podemos ver un esquema del espectro electromagnético.

Cuando Wilhelm Conrad Röntgen⁶ descubrió en 1895 una radiación que tenía la propiedad de penetrar en los cuerpos opacos, la bautizó como rayos X, debido a que era una radiación desconocida hasta el momento. Lo que no podía imaginar era la gran cantidad de aplicaciones que esta radiación iba a tener en el futuro. Tiene aplicaciones médicas, científicas,

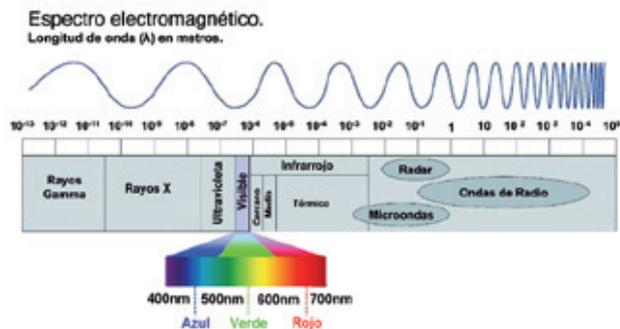


Figura 3. Esquema del espectro electromagnético.

de seguridad en los aeropuertos, por ejemplo, o como visión de superhéroes. Este descubrimiento le valió el Premio Nobel de Física²¹ en 1901.

La aplicación a la cristalografía entra dentro de las aplicaciones científicas y se conoce como difracción de rayos X. Esta técnica está basada en el descubrimiento de Röntgen, junto con los de Max Von Laue y William H. Bragg y William L. Bragg.

Max von Laue⁶ demostró la naturaleza periódica de los cristales mientras pretendía demostrar la naturaleza ondulatoria de esta nueva radiación usando un cristal de blenda frente a los rayos X. Esto le llevó a obtener el Premio Nobel de Física²¹ en 1914.

William H. Bragg y William L. Bragg⁶ (padre e hijo) demostraron la utilidad del fenómeno que había descubierto von Laue para obtener la estructura interna de los cristales. Esto los hizo merecedores del Premio Nobel de Física²¹ en 1915.

En este punto no podemos olvidar mencionar que en 2012 se celebró el centenario de los experimentos de Laue que demostraron que los rayos X podrían ser usados en cristalografía. Y que la ONU ha declarado 2014 *Año Internacional de la Cristalografía*.^{26,27} Por estas razones, queremos hacer públicos estos resultados haciendo coincidir su publicación con esta fecha tan importante para los cristalógrafos y así poner nuestro granito de arena a la gran cantidad de actividades que se organizarán tanto a nivel nacional como internacional.

En todas estas teorías se basa el funcionamiento de los difractómetros de rayos X (Figura 4), que son los equipos que utilizamos para “ver” la estructura interna de los cristales y cuyo funcionamiento podemos comparar con el de un microscopio óptico⁶ o electrónico (Figura 5).



Figura 4. Difractómetro de rayos X de monocristal.²⁸

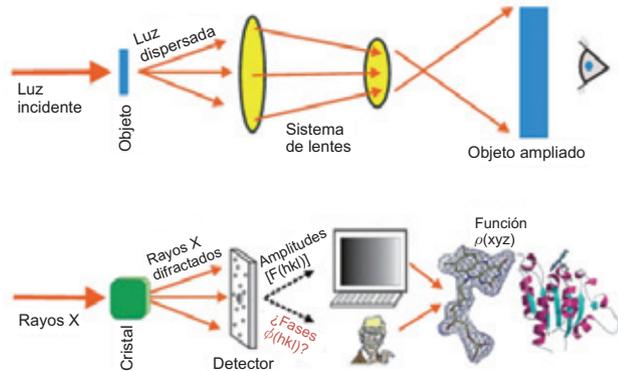


Figura 5. Comparación entre el microscopio óptico y la difracción de los rayos X.⁶

Los rayos X son uno de los conceptos científicos más utilizados en el cine. Es uno de los súper poderes más apreciados, por lo que podemos utilizar otras películas o series de televisión para introducirlos, por ejemplo, cualquiera de las películas de la saga *Superman*, la serie *Smallville* (2001), que nos presenta los inicios de Superman desde su infancia o la película de 1963 *El hombre con rayos X en los ojos*, que nos cuenta la historia de un doctor que utiliza un colirio especial que le confiere visión de rayos X. En todos estos ejemplos y, concretamente, en la escena utilizada en este apartado, también se hace mención al comportamiento de los rayos X en presencia de plomo. Este metal tiene gran cantidad de aplicaciones,²⁹ entre las cuales se encuentra la de protección de los rayos X, ya que, debido a su alta densidad, los bloquea. Por este motivo se utiliza, por ejemplo en medicina,³⁰ los delantales de plomo protegen las partes del cuerpo del paciente que no se quieren irradiar durante una radiografía. La misma propiedad que capacita al plomo como protector hace que Superman no pueda ver a través de él, tal y como ocurre cuando intenta “ver” la ropa interior de Lois Lane.

Breaking Bad, Alicia en el país de las maravillas y la quiralidad

Breaking Bad es una de las series más populares y laureadas desde que se estrenó en 2008. Se basa en la vida de un profesor de Química que tras serle diagnosticado un cáncer de pulmón terminal se plantea qué será de su familia cuando él falte, por lo que comienza a utilizar sus conocimientos para fabricar metanfetamina y, de ese modo, asegurar el futuro económico de su familia.

En el segundo capítulo de la primera temporada titulado *El gato está en la bolsa* podemos encontrar una escena en que el protagonista está explicando a sus alumnos el concepto de quiralidad y el ejemplo de la talidomida.

La quiralidad³¹ es la propiedad de un objeto de no ser superponible con su imagen especular (la imagen en el espejo). Los enantiómeros son pares de entidades moleculares que son imágenes especulares una de la otra y no son superponibles, por ejemplo, las manos (Figura 6).

La talidomida³³ [N-(2,6-dioxo-3-piperidil)ftalimida] fue comercializada durante los años 50 para el tratamiento sintomático de las náuseas y los vómitos durante el embarazo. A pesar de que era un fármaco eficaz para el tratamiento de

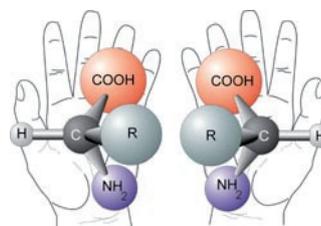


Figura 6. Moléculas quirales. Imágenes especulares no superponibles.³²

dichas náuseas, empezó a observarse el nacimiento de bebés con malformaciones físicas, alteraciones cardíacas, renales, digestivas, oftálmicas y auditivas. Tras varios estudios, se descubrió que la talidomida es una molécula quiral,^{34,36} de tal modo, que uno de los enantiómeros tenía el potencial teratogénico (esa capacidad para provocar malformaciones), mientras que el otro era el responsable de las actividades farmacológicas deseadas (Figura 7). Hasta entonces, la mayor parte de los fármacos sintéticos quirales se preparaban y comercializaban como mezclas racémicas. Este descubrimiento de las propiedades quirales de la talidomida tuvo un gran impacto en el proceso de patentes de fármacos con muchas implicaciones económicas, ya que las compañías farmacéuticas tuvieron que diseñar nuevas síntesis para obtener sustancias enantioméricamente puras y la cristalografía se volvió indispensable, ya que la diferenciación de enantiómeros sólo puede realizarse de modo seguro e inequívoco mediante la difracción de rayos X.

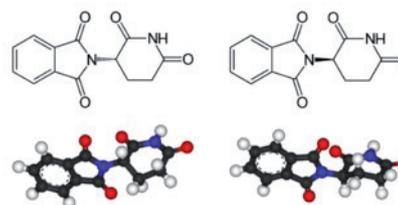


Figura 7. Enantiómeros de la talidomida. El enantiómero de la izquierda es el teratogénico.

Una alternativa para explicar los conceptos de quiralidad y enantiómeros es *Alicia en el País de las Maravillas*. Este libro fue escrito por Lewis Carroll en 1865 y llevado al cine por Disney en 1951 y más recientemente por Tim Burton, en 2010.

Carroll era matemático y su libro está plagado de ejemplos matemáticos y cristalográficos. Por ejemplo, para explicar



Figura 8. Imagen de los gemelos de *Alicia en el país de las maravillas* en las diferentes versiones: el libro³⁷ a la izquierda, la versión de Disney³⁸ en el centro y la versión de Tim Burton³⁹ a la derecha.

la quiralidad podemos utilizar la famosa pregunta de Alicia sobre si la leche tendrá el mismo sabor al otro lado del espejo. Pero el ejemplo de quiralidad más famoso son los gemelos, Tweedledee y Tweedledum. En todas las versiones los gemelos son enantiómeros (Figura 8).

The Big Bang Theory y la estructura del ADN

The Big Bang Theory es una de las series más populares y más útiles para utilizar en divulgación. Trata sobre la vida cotidiana de dos físicos (uno teórico, el otro experimental), un ingeniero y un astrofísico que trabajan en el Instituto Tecnológico de California. Los protagonistas nos presentan una gran cantidad de conceptos físicos y químicos de una manera muy amena y, a la vez muy rigurosa. David Saltzberg,⁴⁰ profesor de la Universidad de California, es el supervisor científico de la serie y responsable del rigor científico de los guiones.

La estructura del ADN puede ser introducida utilizando casi cualquier capítulo de esta serie, ya que los protagonistas tienen en su salón un modelo de doble hélice del ADN que aparece en gran cantidad de escenas.

El modelo de doble hélice del ADN fue descubierto gracias a los experimentos de difracción de rayos X llevados a cabo por Rosalind E. Franklin.⁴¹ Desgraciadamente, su importantísima aportación a esta investigación fue olvidada y James Watson, Francis Crick y Maurice Wilkins recibieron el Premio Nobel de Medicina²¹ en 1962 ignorando las contribuciones de Rosalind a esta investigación.

En su artículo *Molecular Structure of Nucleic Acids*,⁴² Watson y Crick describen por primera vez la estructura del ADN y sugieren un posible mecanismo de copia del material genético. El modelo propuesto^{43,44} (Figura 9) para la estructura del ADN justifica los datos de difracción de rayos X y los apareamientos de bases característicos del ADN, es decir, adenina con timina y guanina con citosina. Este modelo consiste en dos cadenas helicoidales de polinucleótidos enrolladas alrededor de un eje común para formar una doble hélice que gira de izquierda a derecha. En la hélice, las dos cadenas o hebras son antiparalelas, es decir, las cadenas corren en direcciones opuestas. Las bases púricas y pirimí-

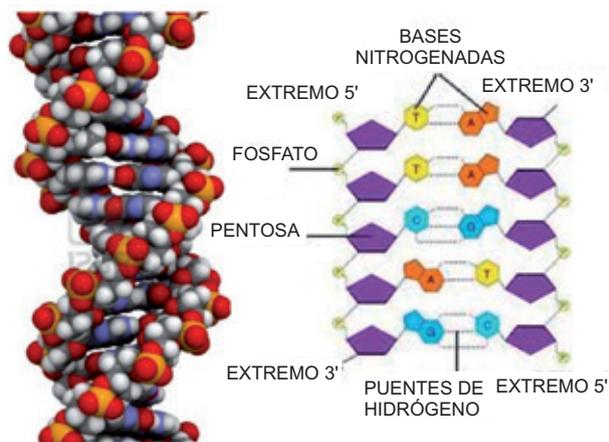


Figura 9. Modelo de ADN de doble hélice (izquierda). Apareamiento característico de bases y unión de las dos cadenas (derecha).

dínicas de ambas hebras, que son hidrofobas, se encuentran apiladas en el interior de la doble hélice mientras que las unidades de fosfato y desoxirribosa están en el exterior. Los planos que contienen las bases son perpendiculares a la doble hélice. Los planos que contienen los azúcares están formando ángulos próximos a 90° con los de las bases. Las dos cadenas permanecen unidas por enlaces de hidrógeno entre los pares de bases, siempre con el apareamiento característico del ADN.

Conclusiones

El cine y la televisión son una poderosa herramienta divulgativa. Con motivo del *Año Internacional de la Química*, utilizamos estas herramientas para introducir conceptos químicos. Ahora nos aproximamos a la cristalografía coincidiendo con el *Año Internacional de la Cristalografía*.

Se han introducido los conceptos más importantes de la historia y el potencial científico y tecnológico de la cristalografía a través de su presencia en las series y las películas de cine y televisión y otros medios que llegan al gran público. De esta manera presentamos el estado cristalino y las formas alotrópicas del carbono apoyándonos en la famosa película *Superman III* y *The Big Bang Theory*, los rayos X utilizando una escena de *Superman I*. La quiralidad se introduce gracias a una escena de *Breaking Bad* y a *Alicia en el país de las Maravillas* y la estructura del ADN, por su parte, haciendo uso de una de las series más famosas entre los jóvenes *The Big Bang Theory*. De este modo la complejidad de introducir estos conceptos se ve superada gracias a la forma amena y popular en que se presentan.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico del Ministerio de Ciencia e Innovación Español (MAT2010-15094 y ‘Factoría de Cristalización’ Consolider Ingenio 2010) y los fondos FEDER.

Bibliografía

1. L. Torre-Fernández, S. García-Granda, *Anales Quím.* **2012**, *108*, 44.
2. Web de la IUCr, <http://bit.ly/1b1p5Z7>, visitada el 25/02/2014.
3. Web sobre divulgación de la IUCr, <http://bit.ly/LcDYGC>, visitada el 25/02/2014.
4. Web de la “Escuela de Erice”, <http://bit.ly/1hOaDBI>, visitada el 25/02/2014.
5. Web de la “Escuela de Cristalografía de Zúrich”, <http://bit.ly/1h19oXr>, visitada el 25/02/2014.
6. Web divulgativa sobre cristalografía, <http://bit.ly/1gsS4IU>, visitada el 25/02/2014.
7. Web del “Bilbao Crystallographic Server”, <http://bit.ly/1k8MJxX>, visitada el 25/02/2014.
8. Web de la “Escuela sobre el Método Rietveld”, <http://bit.ly/MqPteg>, visitada el 25/02/2014.
9. Web del “Máster en cristalografía y Cristalización”, <http://bit.ly/1b1qC1A>, visitada el 25/02/2014.
10. Web de la “Factoría de Cristalización”, <http://bit.ly/OxxkgC>, visitada el 25/02/2014.

11. Web del grupo de investigación SYSTAM, <http://bit.ly/1cKQiJg>, visitada el 25/02/2014.
12. Web del “Concurso de Cristalización en la Escuela, edición 2013-2014”, <http://bit.ly/196o7Fe>, visitada el 25/02/2014.
13. Web del “Campus Científicos de Verano, 2013”, <http://bit.ly/1k6S7om>, visitada el 25/02/2014.
14. Web de la OTRI, <http://bit.ly/1po31Xu>, visitada el 25/02/2014.
15. Web de la “Semana de la Ciencia 2013”, <http://bit.ly/1hOcNRN>, visitada el 25/02/2014.
16. Web de “ECM27”, <http://bit.ly/1fBnxQ8>, visitada el 25/02/2014.
17. K. P. C. Vollhardt, N. E. Schore en *Química Orgánica. Estructura y función*, Ediciones Omega, S.A., Barcelona, **2000**, pp. 565, 656, 657.
18. Información sobre el diamante, <http://bit.ly/1jwyUtu>, visitada el 25/02/2014.
19. Información sobre el grafito, <http://bit.ly/OxA0er>, visitada el 25/02/2014.
20. Información sobre el grafeno, <http://bit.ly/1hfmtWL>, visitada el 26/02/2014.
21. Web del Premio Nobel, <http://bit.ly/1cyjhiw>, visitada el 25/02/2014.
22. Información sobre el carbón, <http://bit.ly/MqR182>, visitada el 25/02/2014.
23. Información sobre diamantes sintéticos, <http://bit.ly/1liiEMa>, visitada el 25/02/2014.
24. Información sobre los rayos X, <http://bit.ly/1ckOSlo>, visitada el 25/02/2014.
25. Información sobre el espectro electromagnético, <http://bit.ly/1mxipyk>, visitada el 25/02/2014.
26. Web de “International Year of Crystallography”, <http://bit.ly/1hqjzfl>, visitada el 25/02/2014.
27. Web del “Año Internacional de la Cristalografía”, <http://bit.ly/1hOenTG>, visitada el 25/02/2014.
28. Web de “Agilent Technologies”, <http://bit.ly/1bIt4VD>, visitada el 25/02/2014.
29. Información sobre las aplicaciones del plomo, <http://bit.ly/1hmGICN>, visitada el 25/02/2014.
30. Información sobre usos del plomo en medicina, <http://bit.ly/1k7tiGM>, visitada el 25/02/2014.
31. H. D. Flack, G. Bernardelli, *Acta Cryst.*, **1999**, A55, 908.
32. Información sobre quiralidad, <http://bit.ly/1cjh4VI>, visitada el 25/02/2014.
33. E. Papaseit, O. García-Algar, M. Farré, *An. Pediatr. (Barc.)*, **2013**.
34. K. P. C. Vollhardt, N. E. Schore en *Química Orgánica. Estructura y función*, Ediciones Omega, S.A., Barcelona, **2000**, pp. 196.
35. N. Vargesson en *Reproductive and Developmental Toxicology*, Elsevier, **2011**, pp. 395-403.
36. Información sobre la talidomida, <http://bit.ly/1mvei5S>, visitada el 25/02/2014.
37. Información sobre Tweedledum y Tweedledee, <http://bit.ly/1hOeRt7>, visitada el 25/02/2014.
38. Imagen de Tweedledum y Tweedledee en la versión de Disney, <http://bit.ly/1ppVc3I>, visitada el 25/02/2014.
39. Imagen de Tweedledum y Tweedledee en la versión de Tim Burton, <http://imdb.to/1eeLmgL>, visitada el 25/02/2014.
40. Información sobre David Saltzberg, <http://bit.ly/1k6Tu6p>, visitada el 25/02/2014.
41. R. Franklin, R. G. Gosling, *Nature* **1953**, 171, 740.
42. J. D. Watson, F. H. C. Crick, *Nature* **1953**, 171, 737.
43. L. Stryer en *Bioquímica*, Editorial Reverté, S.A., Barcelona, **1995**, pp. 80-81.
44. A. L. Lehninger en *Principios de Bioquímica*, Ediciones Omega, S.A., Barcelona, **1988**, pp. 804-805.



XXIV SIMPOSIO DEL GE3C

GRUPO ESPECIALIZADO DE CRISTALOGRAFÍA
Y CRECIMIENTO CRISTALINO



Cristalografía y Sostenibilidad

Bilbao, 23-26 de Junio de 2014 - Bizkaia Aretoa - Paraninfo de la UPV/EHU

