



n.º 9

Serie

El CSIC en la Escuela

Investigación sobre la enseñanza de la ciencia en el aula

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS



MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



CSIC

Fundación **BBVA**



n.º 9

Serie

El CSIC en la Escuela

Investigación sobre la enseñanza de la ciencia en el aula

SERIE EL CSIC EN LA ESCUELA, N.º 9

DIRECCIÓN:

Director: José M.ª López Sancho (CSIC)

Vicedirectora: M.ª José Gómez Díaz (CSIC)

Directora Adjunta: M.ª del Carmen Refolio Refolio (CSIC)

EDITOR:

Esteban Moreno Gómez (CSIC)

COMITÉ DE REDACCIÓN:

Coordinadora: M.ª José Gómez Díaz (CSIC)

José Manuel López Álvarez (CSIC)

Salomé Cejudo Rodríguez (CSIC)

Alfredo Martínez Sanz (colaborador de El CSIC en la Escuela)

COMITÉ CIENTÍFICO ASESOR:

Presidente: Martín Martínez Ripoll (CSIC)

Gerardo Delgado Barrio (CSIC)

Enrique Gutiérrez-Puebla (CSIC)

Jaime Julve Pérez (CSIC)

M.ª Ángeles Monge Bravo (CSIC)

Pilar López Sancho (CSIC)

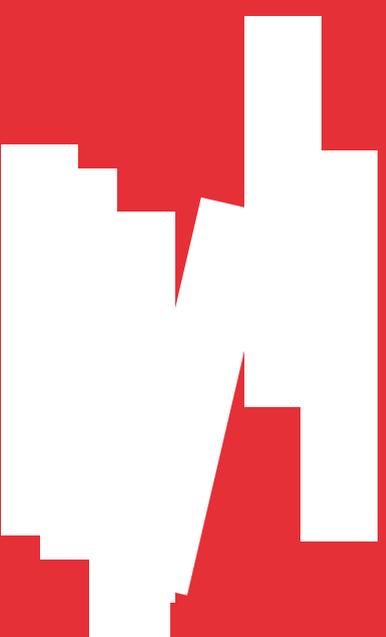
Almudena Orejas Saco del Valle (CSIC)

María Ruiz del Árbol (CSIC)

Javier Sánchez Palencia (CSIC)

Inés Sastre Prats (CSIC)

Pilar Tígeras Sánchez (CSIC)



n.º 9

Serie

El CSIC en la Escuela

Investigación sobre la enseñanza de la ciencia en el aula

CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
MADRID, 2013

Reservados todos los derechos por la legislación en materia de Propiedad Intelectual. Ni la totalidad ni parte de este libro, incluido el diseño de la cubierta, puede reproducirse, almacenarse o transmitirse en manera alguna por medio ya sea electrónico, químico, óptico, informático, de grabación o de fotocopia, sin permiso previo por escrito de la editorial.

Las noticias, los asertos y las opiniones contenidos en esta obra son de la exclusiva responsabilidad del autor o autores. La editorial, por su parte, solo se hace responsable del interés científico de sus publicaciones.

Catálogo general de publicaciones oficiales:

<http://publicacionesoficiales.boe.es/>

EDITORIAL CSIC: <http://editorial.csic.es> (correo: publ@csic.es)

Para publicar en *Serie El CSIC en la Escuela:*

<http://www.csicenlaescuela.csic.es/publicaciones.htm>



 **CSIC**

Fundación **BBVA**

© CSIC

e-ISBN (obra completa): 978-84-00-09299-3

e-ISBN (n.º 9): 978-84-00-09659-5

e-NIPO: 723-13-039-9

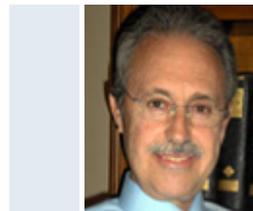
Diseño y maquetación: Alejandro Martínez de Andrés

Ilustraciones: Luis Martínez Sánchez y Alejandro Martínez de Andrés

The logo for the index, featuring a square icon with a vertical line on the left and the word 'ÍNDICE' in a bold, sans-serif font.

¿Cómo aprendimos a «ver» los átomos? <i>M. Martínez-Ripoll</i>	7
La estructura de las revoluciones científicas y el caso especial de la óptica <i>E. Moreno, M.ª C. Refolio y José M.ª López</i>	33
El pensamiento divergente en el esquema de construcción de conocimiento de Piaget <i>M.ª J. Gómez y José M.ª López</i>	54

¿Cómo aprendimos a «ver» los átomos?



Martín Martínez-Ripoll*

*Departamento de Cristalografía y Biología Estructural
Instituto de Química-Física «Rocasolano», CSIC. Madrid*

Palabras clave

Átomos, cristales, rayos X, química.

Resumen

El átomo es la unidad de materia más pequeña de un elemento químico, que mantiene la identidad y propiedades de dicho elemento, imposible de dividir mediante procedimientos químicos convencionales. Los átomos, aisladamente o en forma de agrupaciones que denominamos moléculas, están en todas partes, en el aire, en la tierra, en el agua y en los seres vivos, formando todo tipo de materia existente en la Naturaleza. En 2012 celebramos el centenario de uno de los hallazgos más llamativos de la ciencia, la constatación de que los rayos X interaccionaban con la materia ordenada, los cristales, a través del fenómeno denominado difracción, demostrando la constitución repetitiva de éstos últimos. Estos descubrimientos, debidos al físico alemán Max von Laue (laureado Nobel de Física en 1914), fueron seguidos por una buena dosis de hallazgos que cambiaron la historia de la Química, Física, Biología, Bioquímica y de la Biomedicina, ya que nos permitieron «iluminar» la materia para poder «ver» los átomos en los cristales y poder averiguar cómo están constituidos los materiales, las moléculas, las hormonas, los ácidos nucleicos, los enzimas, las proteínas, los virus...; a qué se deben sus propiedades y cómo podemos entender y, por lo tanto, modificar su funcionamiento en una reacción química, en un tubo de ensayo o en el interior de un ser vivo.

La naturaleza e importancia de los átomos y de sus agrupaciones

La teoría atómica, que nació hace miles de años como un concepto filosófico, establecía que la Naturaleza estaba formada por unidades básicas, unitarias, que llamaron átomos (de la palabra griega «atomos», que significa «indivisible»). Sin embargo, esa creencia terminó a finales del siglo XIX, gracias a diversos experimentos sobre el electromagnetismo y la radiactividad, que demostraron que el supuesto

.....
* E-mail del autor: xmartin@iqfr.csic.es.

«átomo indivisible» era realmente un conglomerado de algunas partículas subatómicas que pueden tener existencia propia. La zona más interior de los átomos, también denominada núcleo, está formada por protones (con 1 unidad de carga eléctrica positiva y con 1 unidad de masa relativa) y neutrones (partículas sin carga y aproximadamente con la misma masa que los protones), mientras que la zona más externa del átomo está ocupada por los electrones (partículas sin apenas masa, unas 2000 veces menor que la de los protones o neutrones, y con 1 unidad de carga negativa), tal como se muestra en la **Tabla 1**.

	Masa relativa	Carga eléctrica relativa
Protón	1	+1
Neutrón	1	0
Electrón	0.000544	-1

Tabla 1. Masa y carga de las partículas fundamentales de los átomos

La existencia del electrón, postulada por el físico irlandés G. Johnstone Stoney (1826-1911) como una unidad de carga eléctrica en el campo de la electroquímica, fue descubierta como partícula en 1897 por el físico británico Joseph John Thomson (1856-1940), en el Laboratorio Cavendish de la Universidad de Cambridge, gracias a varios experimentos con rayos catódicos^[1]. Aunque el primer modelo moderno de la estructura interna de los átomos fue introducido en 1913 por el físico danés Niels Bohr (1885-1962) para explicar, entre otros aspectos, cómo los electrones pueden tener «órbitas» estables alrededor del núcleo^[2] (**Fig. 1**), hoy sabemos que los electrones (representados en la **Fig. 1** como partículas) muestran también un comportamiento de tipo ondulatorio (como el de las ondas de radio) y que desde el punto de vista formal es más real representarlos como una nube de «densidad electrónica», más o menos esférica que rodea el núcleo (**Fig. 2**).

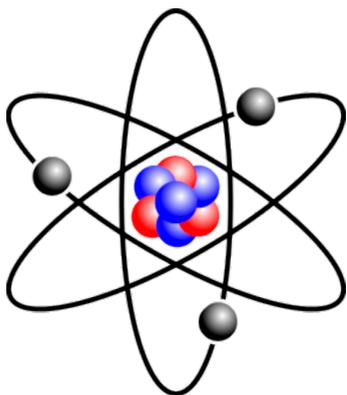


Fig. 1. Modelo atómico de Bohr para un átomo de litio.

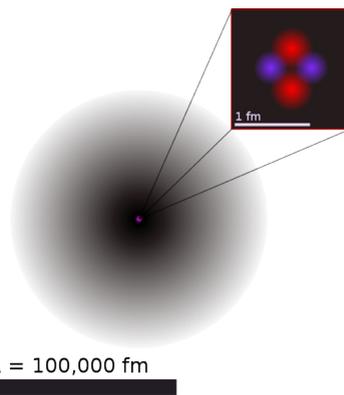


Fig. 2. Representación de la nube de densidad electrónica alrededor del núcleo atómico

Pero independientemente del modelo físico mediante el cual representemos los átomos, lo cierto es que éstos son las partículas que llenan el Universo. Y normalmente lo hacen en forma de agrupaciones que se mantienen gracias a un equilibrio de interacciones de corto alcance y que implican atracción y repulsión entre los átomos. Dichas interacciones de corto alcance se denominan «enlaces» y pueden ser de varios tipos, distinguiéndose entre los llamados:

- Enlaces metálicos, típicos en los materiales de este tipo (sodio, hierro, plata, oro...). Estos enlaces implican que los átomos del material se mantienen unidos gracias a una nube global de electrones, deslocalizada, que comparten entre sí todos los átomos.
- Enlaces iónicos. Son típicos en compuestos como las sales (por ejemplo la sal común o Cloruro Sódico, NaCl), en donde la atracción entre los átomos es debida a fuerzas electrostáticas, ya que previamente ha habido una transferencia de electrones entre los átomos que componen el material, formándose lo que se denominan «iones», es decir átomos que al perder o ganar electrones dejan de ser neutros en carga. En el caso mencionado de la sal común, la unión entre los centros atómicos de los elementos Sodio y Cloro se realiza por que éstos han perdido y ganado un electrón, respectivamente, convirtiéndose en Na^+ y Cl^- , y al ser cargas de distinto signo, se atraen (**Fig. 3**).
- Enlaces covalentes. Son los enlaces entre átomos más comunes en la Naturaleza y responsables de la formación de las agrupaciones de estas partículas que conocemos con el nombre de moléculas, las cuales se dan fundamentalmente (aunque no sólo) en la denominada materia orgánica, incluyendo la materia viva. Al contrario de como ocurre en el enlace iónico, en donde existe transferencia de electrones entre los átomos, el enlace covalente se caracteriza porque genera un equilibrio estable de fuerzas de atracción y repulsión entre los átomos al compartir electrones en dichas uniones (**Fig. 4**).

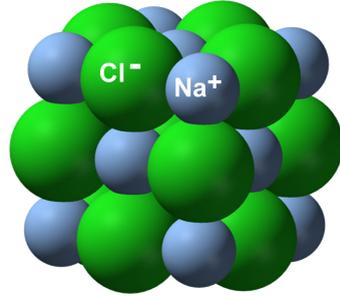


Fig. 3. Representación de la estructura de un micro-grano de sal común (Cloruro Sódico). Los átomos se mantienen unidos gracias a la atracción entre los mismos al soportar cargas eléctricas de diferente signo (verde: Cloro; azul: Sodio), es decir, en estado ionizado.

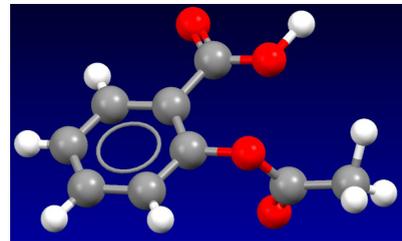


Fig. 4. Representación de una molécula de aspirina, mostrando los enlaces covalentes en forma de barras entre sus átomos, los cuales aparecen como bolas de distintos tamaños y colores (gris: carbono, rojo: oxígeno, blanco: hidrógeno).

Pero al margen de los diferentes modos con los que los átomos se pueden unir entre sí (enlaces), es muy importante resaltar que las propiedades de la materia (inanimada o no) son consecuencia de la forma mediante la cual los átomos y las moléculas se compactan para formar la estructura de la materia (molecular o no), y de ahí la relevancia que conlleva el conocimiento íntimo de dicha estructura, es decir, de la posición relativa de los átomos en el espacio y de las distancias que los separan. Resulta, pues, obvio el interés que supone conocer el desarrollo científico que subyace a la posibilidad de poder «ver» los átomos (y las moléculas), ya que sólo mediante ese conocimiento podemos entender y modificar sus propiedades y funcionamiento en una reacción química, en un tubo de ensayo o en el interior de un ser vivo.

Uno de los ejemplos más simples que podemos tomar para ilustrar la importancia de la estructura interna de los materiales (animados o inanimados) es el caso de un elemento químico simple, conocido por todos, el Carbono, que se muestra en la naturaleza en dos formas estructurales internas diferentes y que le confieren propiedades radicalmente distintas: el diamante y el grafito (**Fig. 5**). Así, el diamante es una piedra preciosa transparente; es el material más duro existente, un conductor térmico excepcional y apenas conduce la electricidad. Sin embargo, el grafito, que también es carbono puro (y que está en nuestros lápices), es un material muy blando, un lubricante excelente que apenas conduce el calor y un estupendo conductor eléctrico.

Pues bien, este tipo de diferencias estructurales pueden también extrapolarse para comprender la funcionalidad de cualquier otro tipo de materia y proponer así cambios racionales que mejoren la funcionalidad de nuevos materiales, de drogas, antibióticos, proteínas, enzimas (**Fig. 6**), virus, ácidos nucleicos y de todos sus complejos...

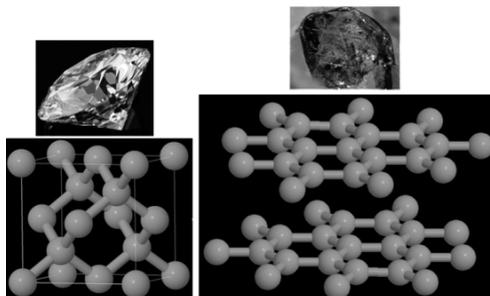


Fig. 5. Izquierda: Representación de la estructura del diamante. Obsérvese que la dureza es consecuencia de la rigidez de la estructura, ya que cada átomo está unido a otros cuatro vecinos. Derecha: representación de la estructura del grafito. Obsérvese que su propiedad como lubricante puede entenderse por el desplazamiento de unas capas respecto de otras.

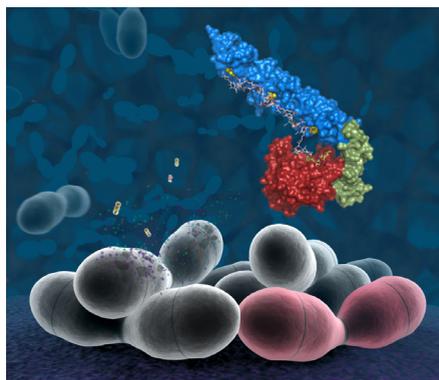


Fig. 6. Arriba, estructura de LytC³, un enzima que genera el *Streptococcus pneumoniae* (abajo) para llegar a ser más virulento, aniquilando a sus congéneres menos capaces.

Las dimensiones de la Naturaleza

Aunque ya intuimos que los átomos son partículas muy pequeñas de materia, antes de comenzar a introducir las bases científicas que nos permitieron «ver» a los átomos por primera vez, resulta muy ilustrativo situar estas partículas en las dimensiones relativas de la Naturaleza, haciéndonos la pregunta de ¿cómo son de pequeños?. Y para responder a esta pregunta nada mejor que hacer una comparación entre las cosas que nos rodean a diario con lo que vemos al mirar hacia el cielo...

Por ejemplo, según los astrónomos, para recorrer el tamaño de lo que llamamos Universo conocido (**Fig. 7**) necesitaríamos viajar cien mil millones de años a la velocidad de la luz (a unos 300.000 km/s), con lo cual recorreríamos una distancia aproximada de mil cuatrillones de metros:

1.000₄000.000₃000.000₂000.000₁000.000 m, es decir, 10^{27} m, o lo que es lo mismo, 10^{24} km (que equivale a un cuatrillón de km).

En el interior de este Universo existen, al menos mil millones de lo que conocemos con el nombre de galaxias (**Fig. 8**), como nuestra Vía Láctea (**Fig. 9**), que tardaríamos en recorrerla unos cien mil años a la velocidad de la luz, que equivale a una dimensión de unos mil trillones de metros: 1.000₃000.000₂000.000₁000.000 m,

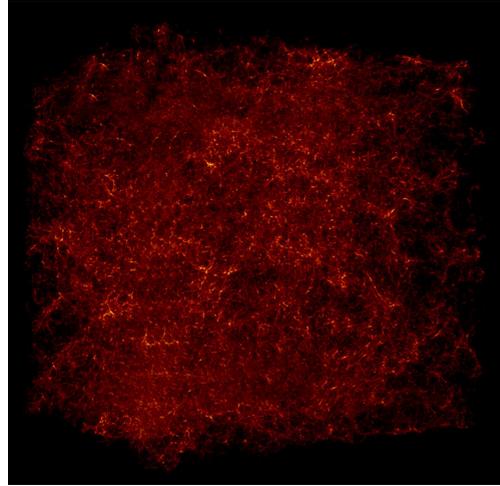


Fig. 7. Representación de lo que denominamos Universo conocido.

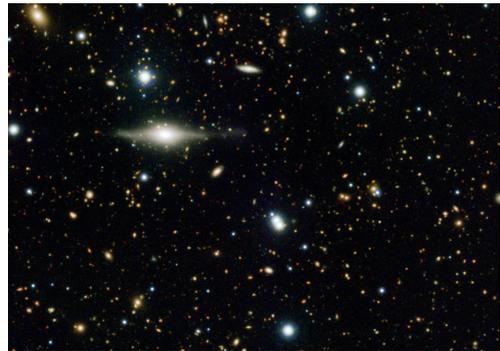


Fig. 8. Visión de lo que denominamos galaxias, una parte del Universo conocido.



Fig. 9. Visión de la galaxia Vía Láctea, una concentración de estrellas y planetas.

es decir, 10^{21} m, o lo que es lo mismo, 10^{18} Km (1 trillón de km), aunque hay galaxias de muchas formas y tamaños (**Fig. 8**).

Así que, para hacernos una idea de las dimensiones relativas de los objetos que queremos «ver» (los átomos), debemos descender en la escala de tamaños hasta lo que denominamos 1 Å (Ångström) que equivale a 0.000000000001 km = 10^{-10} m, o lo que es lo mismo, que desde el tamaño del Universo conocido hasta los átomos, hemos de dividir por 10^{37} , es decir por 10 sextillones (¡un 1 seguido de 37 ceros!): $10_6.000.000_5.000.000_4.000.000_3.000.000_2.000.000_1.000.000$.

O desde lo cotidiano, como es la dimensión de un garbanzo (**Fig. 10**), para llegar a la dimensión de un átomo, hemos de dividir por cien millones ($10^8 = 100_1.000.000$).



Fig. 10. Garbanzos de tamaño próximo a 1 cm.

¡Para ver, necesitamos iluminar!

Tal como el lector se imagina, para «ver» un objeto (su forma y sus dimensiones, es decir, su estructura) necesitamos de algún tipo de «luz apropiada». En el caso de las estrellas del Universo, es obvio que necesitamos de grandes telescopios que producen imágenes con luz visible, o bien los llamados radiotelescopios, que captan ondas de radio, generalmente a través de una gran antena parabólica, o un conjunto de ellas. Con objetos más cotidianos, por ejemplo, unos garbanzos, es obvio que nos bastaría con una linterna convencional de luz visible y, en todo caso, con un pequeño microscopio óptico, ya que con todo ello podríamos escudriñar todos los aspectos y formas que nos ofrecen estos granos de legumbres, tal como haríamos para estudiar los aspectos morfológicos del ala de una mosca (**Fig. 11**).

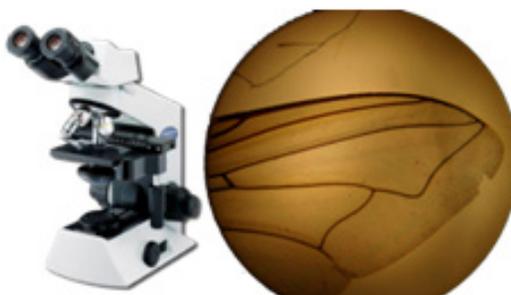


Fig. 11. Microscopio óptico e imagen de los detalles (del orden de 0.1 cm) del ala de una mosca.

Pero, si seguimos bajando en dimensiones, como por ejemplo, para intentar ver con cierto detalle la superficie de una bacteria, necesitaremos hacer uso de los denominados microscopios electrónicos, que utilizan electrones en lugar de fotones de

luz visible para formar imágenes de objetos muy diminutos, pudiendo alcanzar ampliaciones de hasta 5.000 veces las imágenes de los mejores microscopios ópticos. Tal es el caso de la **Fig. 12**, en donde se muestra un racimo de bacterias de una determinada especie y en donde cada bacteria tiene una dimensión del orden de $1.5 \mu\text{m}$ (micrómetros), es decir 0.0000015 cm , o lo que es lo mismo, 1.5 veces la millonésima parte de un metro.

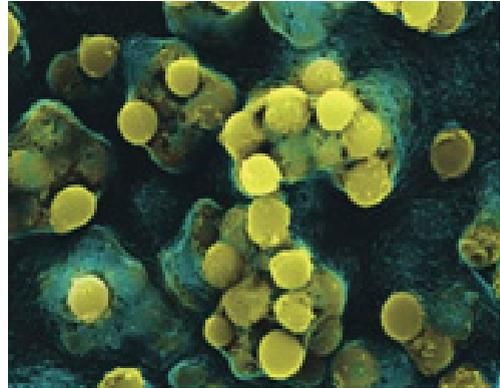


Fig. 12. Aspecto de un racimo de bacterias del tipo *Streptococcus pneumoniae*, vistas mediante un microscopio electrónico.

¡Pero, ni la luz visible, ni los electrones, nos sirven para llegar «ver» totalmente los átomos y las moléculas y meterlos en sus entresijos! Para ello necesitamos una «luz» cuyos fotones tengan una energía (o una longitud de onda) del mismo tamaño (o menor) que estas partículas, y que, por lo tanto, sea capaz de «iluminar», de interactuar con los detalles más recónditos de la materia a ese nivel de detalle. ¡Pues esa luz es la de los rayos X, porque tiene una longitud de onda muy próxima al tamaño de los átomos ($10^{-10} \text{ m} = 10^{-8} \text{ cm}$), es decir, lo que llamamos 1 \AA . Sin embargo, como veremos, esta técnica de «visión» se complica con el caso de los átomos y los rayos X.

Al «iluminar» con luz visible un objeto de las dimensiones de nuestro entorno cotidiano (un edificio, una persona, un lápiz), las «lentes» de nuestros ojos son capaces recomponer de forma automática los haces de fotones de luz visible dispersados por dichos objetos y, por lo tanto, somos capaces de percibir las formas y detalles de los mismos. Y para ver objetos más pequeños (microscópicos) necesitamos de un sistema de lentes de vidrio capaces de reconvertir directamente dicha interacción, dando lugar a una imagen ampliada del objeto observado (**Fig. 13**). Y de forma similar ocurre (aunque sin lentes de vidrio) con los haces de electrones que se dispersan a través de un objeto de tamaño ínfimo en un microscopio electrónico, ya que la carga eléctrica de los haces de electrones dispersados se hacen re-converger mediante

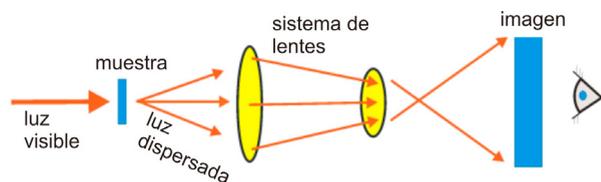


Fig. 13. Reconstrucción automática de una imagen mediante un microscopio óptico.

los haces de electrones dispersados se hacen re-converger mediante

campos magnéticos; sin embargo, en estos casos, el nivel de detalle alcanzado (resolución) no es el suficiente para llegar a penetrar a nivel de los átomos con el grado de detalle deseado.

Entonces, ¿qué ocurre al iluminar los átomos con rayos X?

Cuando pretendemos «ver» los átomos y las moléculas con los rayos X, nos encontramos con dos problemas bien diferenciados:

1) El primero de ellos, y en contraposición de la interacción de la luz visible con los objetos macro o microscópicos, es que la interacción de los rayos X con los átomos (materia submicroscópica), o con las moléculas, es extremadamente débil y produce un efecto devastador, tal como se muestra en la **Fig. 14**, tras el efecto de la interacción de un haz de rayos X con una macromolécula (una proteína), y

2) Aunque la mencionada interacción fuera sensiblemente más intensa de lo que es, desgraciadamente no existe una lente física capaz de reconvertir los haces de rayos X dispersados, para generar directamente la imagen ampliada de la molécula, objeto del experimento.

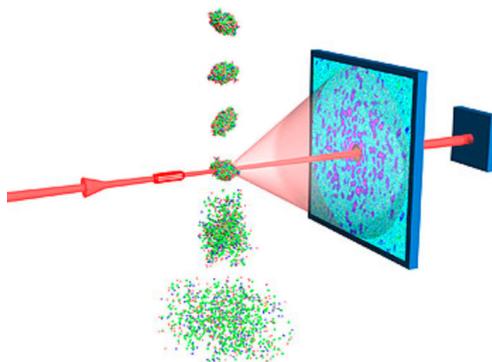


Fig. 14. La interacción de los rayos X (línea roja) con moléculas aisladas es extremadamente débil y devastador.

Así que, con todo ello, nos preguntamos de nuevo: ¿cómo podemos realmente ver los átomos y las moléculas?

Pues bien, teniendo en cuenta los dos

puntos mencionados anteriormente, la respuesta es: con rayos X, pero con muchas moléculas juntas y ordenadas, para que el efecto conjunto amplifique la señal de la interacción, es decir, usando lo que se conoce con el nombre de cristales (materia homogénea y ordenada). Pero, además, y dado lo expuesto en el apartado 2), resulta que no tenemos más remedio que suplir la ausencia de lentes físicas por «lentes virtuales», que sean capaces de combinar entre sí los haces de rayos X dispersados y proporcionar, de algún modo, la imagen ampliada de la molécula (**Fig. 15**). Todo este conjunto de conocimientos y técnicas se conoce con el nombre de Cristalografía.

En el experimento de la **Fig. 15**, es decir, en el de la interacción de los rayos X con los cristales, lo que hacemos es reforzar la interacción de la «luz» de los rayos X con los átomos (y con las moléculas), haciéndolos incidir sobre millones de copias ordenadas de los mismos (cristales). Y esta interacción es realmente llamativa, ya que, cada electrón, de cada átomo en nuestro cristal, se convierte en un nuevo centro emisor de rayos X, que dispersa esta radiación en todas las direcciones, formándose un auténtico enjambre de ondas dispersadas que se componen entre sí cooperativamente, unas de forma totalmente positiva (sumándose), otras de modo totalmente negativo (anulándose), y otras de forma intermedia (**Fig. 16**), lo que, frente a una placa fotográfica (o un detector más sofisticado), conduce a una serie de intensidades resultantes del proceso, que denominamos espectro de difracción (**Fig. 17**).

Y aquí es donde surge el problema que ya adelantaba la **Fig. 15**, puesto que desde las intensidades de difracción necesitamos llegar a la imagen detallada del interior de nuestro cristal, «viendo» los lugares de colocación de cada átomo y pudiendo medir sus distancias en cualquier dirección del espacio.

El modo de hacerlo es resolviendo una ecuación matemática que nos proporciona los máximos de la magnitud que denominamos «densidad electrónica» (**Fig. 18**), y que obviamente deben de coincidir con la localización de los átomos en el espacio tridimensional del cristal.

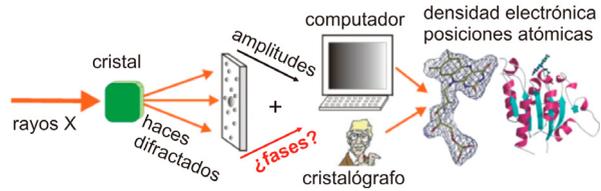


Fig. 15. Reconstrucción de la estructura de una molécula usando rayos X y un cristal formado por una asociación ordenada de dichas moléculas. Por analogía con la Fig. 13, diríamos que este es el denominado «microscopio imposible» de rayos X.

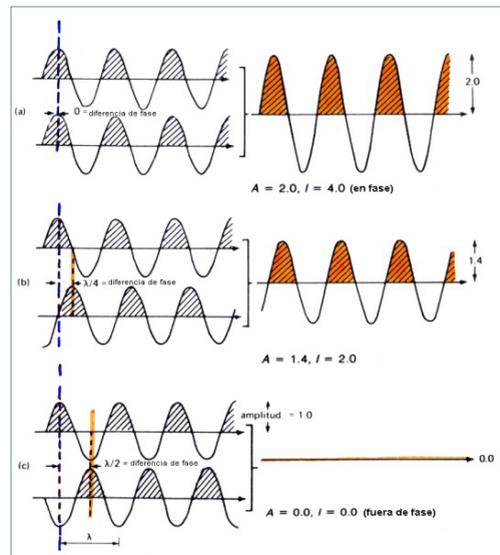


Fig. 16. Modos de interacción de ondas de rayos X emitidos por los electrones de los átomos de un cristal.

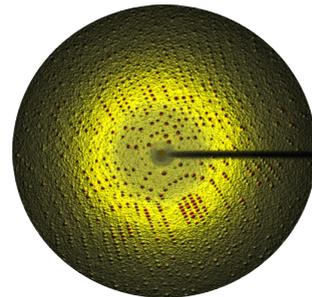


Fig. 17. Una de los cientos (o miles) de «fotografías» del fenómeno de difracción de un cristal de una macromolécula. Cada punto rojo representa una intensidad de difracción.

Pero, tal como se comentaba anteriormente, no existe un camino directo para llegar a esa meta. Las magnitudes medibles en el experimento de difracción son sólo las intensidades (muy relacionadas con $|F(hkl)|$), y no obtenemos información alguna sobre $\Phi(hkl)$. Es decir, de los desfases de cada onda difractada respecto de las demás. Dicho de otro modo, ¡que el camino que nos ofrece la ecuación representada en la **Fig. 18** está vetado!, lo cual se conoce con el nombre del «problema de las fases»

$$\rho(xyz) = \frac{1}{V} \sum \sum \sum |F(hkl)| \cos 2\pi(hx+ky+lz-\Phi(hkl))$$

Fig. 18. Función de densidad electrónica en un cristal, en donde xyz representan las coordenadas de los átomos, V es el volumen de lo que denominamos celdilla elemental (ladrillo repetitivo del que están formados los cristales), $|F(hkl)|$ son magnitudes derivadas de las intensidades de difracción (Figs. 16 y 17), hkl son números enteros que denominan a cada intensidad de difracción, y $\Phi(hkl)$ son los desfases relativos con que «cabalgan» las ondas de rayos X que interfieren entre sí (Fig. 16).

¡Hay que usar cristales! ¿Pero, qué y cómo son los cristales?

Todos hemos oído hablar de los minerales o cristales naturales. Los encontramos a diario sin necesidad de acudir a un museo. Una roca y una montaña están constituidas por minerales, tan cristalinos como el azúcar de un terrón, un trozo de porcelana, el oro de un anillo o el cristal de un enzima o de un virus. Sin embargo, sólo en ocasiones el tamaño de los cristales es lo suficientemente grande para llamar nuestra atención, como es el caso de los bonitos ejemplares que se muestran en la parte izquierda de la **Fig. 19**, aunque las macromoléculas también producen cristales de una gran belleza (**Fig. 19**, derecha).

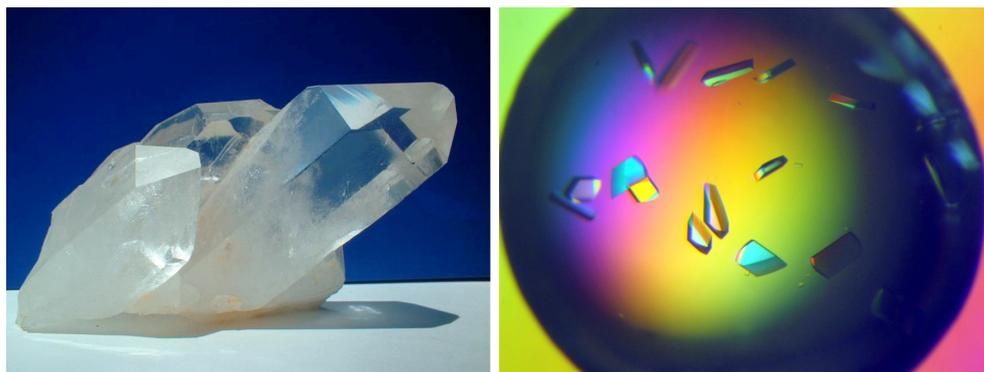


Fig. 19. Izquierda: cristales naturales de cuarzo de unos 3 cm de longitud. Derecha: cristales de una proteína, con un tamaño de aproximadamente 0.01 cm, que crecen en una solución de la misma.

El estado cristalino de la materia es el de mayor orden posible, lo que se refleja en sus propiedades anisótropas (que dependen de la dirección) y formas geométricas definidas (hábitos) cuando éstos están bien formados. Sin embargo, aquí una vez más, «el hábito no hace al monje» y su morfología externa no es suficiente para evaluar la denominada cristalinidad

de un material. La denominada estructura cristalina está caracterizada microscópicamente por la agrupación de iones, átomos o moléculas según un modelo de repetición periódica, y el concepto de periodicidad es sencillo de entender si pensamos en los motivos repetitivos de un papel de pared, en los mosaicos de la Alhambra, o en una formación militar

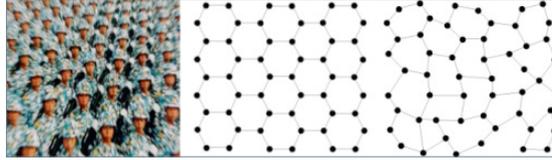


Fig. 20. *Izquierda: Distribución regular en una formación militar. Centro: modelo bidimensional de una ordenación atómica cristalina. Derecha: modelo bidimensional de una distribución atómica desordenada, amorfa, es decir, no cristalina, típica de los vidrios.*

agrupaciones que son bien diferentes de la ausencia de orden atómico típico de los vidrios de nuestras ventanas (Fig. 20, derecha). Estos pequeños fragmentos que se repiten en un cristal son como pequeñas cajas, que denominamos celdillas elementales, y que, conteniendo a los átomos y las moléculas, se apilan en las tres direcciones del espacio (Fig. 21). Este modo ordenado de apilamiento es el responsable de los hábitos que muestran los cristales.

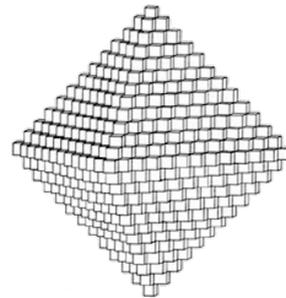


Fig. 21. *Apilamiento de celdillas en un cristal con hábito octaédrico.*

¿Cómo se desarrolló históricamente el nivel de conocimiento en Cristalografía?

Conocida la metodología actual de la Cristalografía, es hora de introducir lo que realmente justifica este relato, es decir, quiénes y cómo nos llevaron al conocimiento de esta bella disciplina, denominada Cristalografía, que usa los cristales para escudriñar en el interior de la materia. Todo lo narrado en los apartados anteriores respecto de los cristales es producto de más de 100 años de trabajo de muchos científicos, algunos que finalmente crearon su hueco en la historia, y otros que, por causas inexplicables, no lo consiguieron. Pero a todos, a unos y a otros, debemos gratitud por su afán de perseguir lo desconocido. Obviamente, este ensayo no recoge el papel de los cientos de personajes a los que nos deberíamos de referir, pero sí al menos a algunos pocos, a los que iniciaron esta aventura desde los principios del siglo XX.

La introducción de estos personajes se ha distribuido en conjuntos cronológicos, designados con calificativos musicales que, con el mayor respeto, creemos adecuados para la relevancia del momento, al menos desde la perspectiva histórica.

«Obertura». Wilhelm Conrad Röntgen descubre la luz X. Un ejemplo de serendipia

Nada de lo descrito aquí habría sido posible sin la contribución de Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923), **Fig. 22**, primer Premio Nobel de Física (1901), por su descubrimiento de los rayos X. Aunque desde el punto de vista biográfico INTERNET⁽⁴⁾ contiene múltiples y variadas referencias relacionadas con el personaje, en las líneas siguientes resumimos los detalles más relevantes y añadimos algunos otros. Röntgen nació en la pequeña ciudad de Lennep de la provincia del Bajo Rin (Alemania) como hijo único del matrimonio entre un comerciante de tejidos y de Charlotte Constanze Frowein, descendiente de una conocida familia residente en dicha ciudad, aunque de origen holandés. Con la edad de 3 años su familia se trasladó a Holanda en donde, desde los 16 a los 20 años, Wilhelm estudió en la Escuela Técnica de Utrech, edad a la que se trasladó a Zurich en donde comenzó y concluyó la licenciatura de Ingeniería Mecánica. Tras algunos años en Zurich como asistente del profesor de Física August Kundt, en 1872 (con 27 años) se trasladó con éste a la Universidad de Würzburg, pero al no poder obtener ningún puesto (por no aprobar los exámenes de latín y griego) acabó en Estrasburgo, en donde obtuvo una plaza de profesor (1874). Cinco años más tarde aceptó un puesto de profesor en la Universidad de Giessen y finalmente, con aproximadamente 45 años, obtuvo una cátedra de Física en Würzburg, en donde llegó a ser Rector.



Fig. 22. Wilhelm C. Röntgen (1845–1923) y la radiografía de la mano de su esposa con un anillo.

Su descubrimiento vio la luz a sus 50 años (noviembre de 1895), tras algunos experimentos con los rayos catódicos y gracias a la circunstancia, totalmente fortuita, de que una lámina de cartón (impregnada en cianuro de Pt-Ba) mostrara una fluorescencia totalmente inesperada. Un mes tardó Röntgen en comprender el alcance del descubrimiento de esa nueva radiación, preparando inmediatamente una comunicación científica para la Sociedad de Física y Medicina de Würzburg, consiguiendo un auténtico e inmediato revuelo a nivel popular. Sin embargo, casi con la

misma velocidad de su ascenso, su pública celebridad pasó por momentos de mínimos, llegando casi a ser tachado de charlatán. Pero fue a principios de 1896 cuando Röntgen comenzó a salir definitivamente de esta situación incómoda, gracias a su decisivo envío, a la revista británica *British Medical Journal*, de una radiografía con un brazo fracturado, lo cual daba idea de la capacidad diagnóstica de su descubrimiento. Sin embargo, debieron pasar bastantes años hasta que su «increíble luz» fuera reconocida como de interés médico, e incluso le reportara el máximo galardón del primer Premio Nobel de Física de 1901. Wilhelm Conrad Röntgen murió en Munich, en febrero de 1923, aquejado de un cáncer intestinal.

«Preludio». Max von Laue, acompañado de Paul P. Ewald, abre las puertas del campo

Si el descubrimiento de Röntgen fue importante para el desarrollo ulterior de todo este conjunto de conocimientos sobre los cristales, el segundo salto cualitativo fue debido a otro alemán, Max von Laue (1879-1960), Premio Nobel de Física de 1914, quien, al querer demostrar la naturaleza ondulatoria de los rayos X, descubrió el fenómeno de la difracción de rayos X por los cristales (**Fig. 23**). Una buena descripción biográfica puede encontrarse a través de la Fundación Nobel^[5]. Max von Laue, nació en un pequeño pueblo de Koblenz como hijo de Julius von Laue, un oficial de la administración militar alemana, al que le fue otorgado el rango nobiliario en 1913. Debido a la profesión paterna, el joven Max pasó su juventud entre varias ciudades alemanas, Brandenburg, Altona, Posen, Berlín y Estrasburgo. Tras su servicio militar, que comenzó en 1898, estudió Matemáticas, Física y Química en la Universidad de esta última ciudad, pero pronto se trasladó a la Universidad de Göttingen y en 1902 a la Universidad de Berlín, en donde comenzó a trabajar con Max Planck. Un año más tarde, tras obtener su grado de doctor, volvió a Göttingen, pero ya en 1905 regresó a Berlín como asistente de Planck, quien, a su vez, llegaría a obtener el Premio Nobel de Física en 1918, es decir cuatro años más tarde que von Laue. Entre 1909 y 1919 pasó por las Universidades de Munich, Zurich, Frankfurt y Würzburg, regresando finalmente a Berlín en donde obtuvo una plaza de profesor.



Fig. 23. Max von Laue (1879-1960).

Fue durante esta última época, en concreto en 1912, cuando von Laue conoció en Munich a Paul Peter Ewald (1888-1985)^[6], quien entonces estaba acabando su tesis doctoral con Arnold Sommerfeld (1868-1951) y quien interesó a von Laue por sus experimentos sobre interferencias entre radiaciones de gran longitud de onda (prác-

ticamente luz visible) sobre un «modelo cristalino» basado en resonadores y cuando, además, todavía estaba en discusión la naturaleza corpuscular u ondulatoria de las radiaciones. Esta idea de Ewald (**Fig. 24**) es la que, finalmente, llevó a von Laue a imaginar qué pasaría si en lugar de tales grandes longitudes de onda se usaran otras de mucha menor longitud, y directamente sobre los cristales, quienes, en teoría, deberían comportarse como rendijas de interferencia muy pequeñas. En reconocimiento del papel fundamental que jugó este científico en el desarrollo de los primeros pasos de la Cristalografía, el Premio y Medalla que otorga trianualmente la Unión Internacional de Cristalografía a las contribuciones más relevantes a esta ciencia, llevan el nombre de Paul Peter Ewald.



Fig. 24. Paul Peter Ewald (1888–1985).

Y así fue como, al hacer incidir un haz de rayos X sobre un cristal de sal común (**Fig. 25**), Max von Laue obtuvo la confirmación de la naturaleza electromagnética de esa extraña radiación que Röntgen había descubierto años atrás, al mismo tiempo que despertó toda una serie de expectativas inmediatas sobre la naturaleza de los cristales. Por este descubrimiento, Max von Laue recibió el Premio Nobel de Física de 1914. Tras la II Guerra Mundial, von Laue fue transportado a Inglaterra con otros varios científicos alemanes y allí permaneció contribuyendo a la creación de la Unión Internacional de Cristalografía, hasta que, en 1946 regresó a Alemania como director del Instituto Max Planck y profesor de la Universidad de Göttingen. Se retiró en 1958, siendo director del Instituto de Química-Física Fritz Haber en Berlín, cargo para el que había sido elegido en 1951. Max von Laue murió a los 80 años (abril de 1960) tras pocos días de sufrir un atropello por un motorista, quien había obtenido su permiso de conducción dos días antes del accidente.

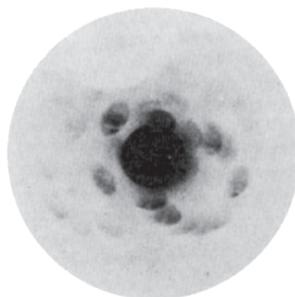


Fig. 25. Primera imagen de difracción, obtenida por Max von Laue con un cristal de Cloruro de Sodio.

«Allegro, ma non troppo». Los Bragg sacan partido al descubrimiento de von Laue

En esta ocasión no pasó lo mismo que con el descubrimiento de Röntgen. No hubo que esperar mucho tiempo, ya que el hallazgo de Max von Laue no pasó desapercibido, al menos para los británicos William Henry Bragg (1862-1942) y su hijo

William Lawrence Bragg (1890-1971), **Fig. 26**, quienes en 1915 compartieron el Premio Nobel de Física al demostrar la utilidad del fenómeno que había descubierto von Laue, para «visualizar» la estructura interna de los cristales.

William H. Bragg^[7] estudió Matemáticas en el Trinity College de Cambridge y posteriormente Física en el Laboratorio Cavendish, hasta que a finales de 1885 fue nombrado profesor en la Universidad de Adelaida (Australia), en donde nació su hijo William Lawrence Bragg.

Su hijo, William Lawrence^[8], estudió también Matemáticas, en la Universidad de Adelaida, hasta que, en 1909 regresó con la familia a Inglaterra y entró como becario en el Trinity College de Cambridge. En otoño de 1912, el mismo año en que Max von Laue hizo público su experimento, comenzó el joven William Lawrence a examinar el fenómeno descrito, que ocurría al interponer un cristal frente a los rayos X, publicando su primer artículo sobre el experimento.

En 1914 Lawrence fue nombrado profesor de Ciencias Naturales en el mismo Trinity College y, ya en el mismo año, se le concedió la honorífica Medalla Barnard. Los dos años (1912-1914) en los que estuvo trabajando con su padre en los experimentos

de refracción y difracción por los cristales dieron lugar al famoso artículo *X-rays and Crystal Structure* publicado en 1915, y con el que su padre, y él mismo (¡con 25 años!) compartieron el Premio Nobel de Física. Padre e hijo pudieron explicar el fenómeno de la difracción de los rayos X por los cristales mediante determinados planos cristalográficos que se comportan como espejos especiales frente a los rayos X (Ley de Bragg), y demostraron que los cristales de sustancias tales como el Cloruro Sódico (NaCl o sal común) no contienen moléculas de NaCl, sino simplemente iones de ambos elementos regularmente ordenados (**Fig. 3**), lo cual revolucionó la Química Teórica y provocó el nacimiento de la nueva ciencia: la Cristalografía de rayos X.

Desgraciadamente, tras la primera guerra mundial, padre e hijo se distanciaron y dieron por finalizado su trabajo conjunto, de tal modo que Henry (el padre) se centró en cristales de compuestos orgánicos mientras que Lawrence lo hizo en compuestos inorgánicos. En 1919 Lawrence aceptó un puesto de profesor de Física en

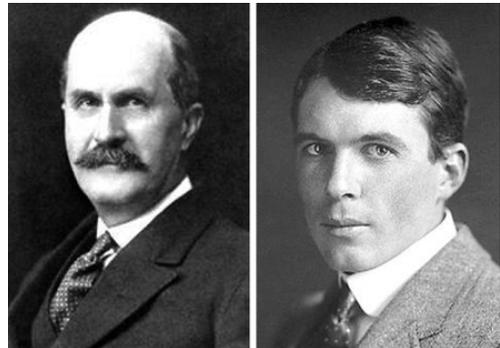


Fig. 26. Izquierda: William Henry Bragg (1862–1942). Derecha: William Lawrence Bragg (1890–1971).

la Universidad Victoria en Manchester, lugar en donde se casó y permaneció hasta 1937. En 1941 padre e hijo fueron nombrados Caballeros (Sir) y un año más tarde (1942) falleció William Henry. En años posteriores Lawrence se interesó por la estructura de los silicatos, los metales y en especial por la química de las proteínas, ocupando el puesto de director del Laboratorio Nacional de Física en Teddington y profesor de Física Experimental en el Laboratorio Cavendish (Cambridge), hasta que, en 1954, fue nombrado director de la Royal Institution en Londres, estableciendo su propio grupo de investigación con el objeto de comenzar a estudiar la estructura de las proteínas mediante el uso de los rayos X. Lawrence falleció en 1971, a la edad de 81 años.

«Allegro molto». Arthur Lindo Patterson dirige y David Harker actúa como solista

Inexplicablemente, el nombre de Arthur Lindo Patterson (**Fig. 27**) está pasando a la historia, al menos desde la última década del siglo XX, casi como un desconocido, desvaneciéndose lentamente, y mucho nos tememos que su nombre quede exclusivamente asociado a un apartado de algún programa de cálculo... Sin embargo, la aportación al conocimiento estructural de los cristales puede considerarse, sin exageración, como el desarrollo singular más importante, tras el propio descubrimiento de los rayos X por Röntgen en 1895. Arthur Lindo Patterson^[9] (**Fig. 27**) nació a principio del siglo XX en Nueva Zelanda, pero muy pronto su familia emigró a Canadá, en donde pasó su juventud. Por alguna razón que desconocemos, fue a la escuela en Inglaterra para luego regresar a Montreal (Canadá) y estudiar Física en la Universidad McGill, obteniendo el grado de licenciado con un trabajo sobre la producción de rayos X «duros» (con pequeñas longitudes de onda) usando la interacción de la radiación β del Radio con los sólidos. Su primer contacto con los experimentos de difracción de rayos X ocurrió durante una estancia de dos años que realizó en el laboratorio de W.H. Bragg en la Royal Institution de Londres. Allí fue consciente de que, si bien en las estructuras cristalinas simples, la ubicación de los átomos en la celdilla era un problema relativamente sencillo, la situación era prácticamente inabordable en el caso de compuestos moleculares, o en general más complejos (**Fig. 18**). ¡La consecuencia sobre el desconocimiento de las fases relativas, $\Phi(hkl)$, que aparece en la fórmula de la **Fig. 18** equivale a querer resolver un puzzle con miles de piezas cuyo perfil desconocemos!



Fig. 27. Arthur L. Patterson (1902–1966).

Tras su estancia en el laboratorio de W.H. Bragg, Arthur L. Patterson pasó un año muy productivo en el Instituto Kaiser-Wilhelm de Berlín, bajo la dirección de Hermann Mark, con una beca del National Research Council de Canadá. Con su trabajo contribuyó decisivamente a la determinación del tamaño de partícula usando la difracción de rayos X, y comenzó a interesarse por las transformadas de Fourier, algo que más tarde le obsesionaría en relación con la determinación de las estructuras cristalinas, es decir, con la solución de la ecuación de la **Fig. 18**.

En 1927 Lindo Patterson regresó a Canadá y un año más tarde concluyó su tesis doctoral en la Universidad McGill. Tras dos años con R.W.G. Wyckoff en el Instituto Rockefeller de Nueva York,

aceptó un puesto en la Johnson Foundation for Medical Physics en Philadelphia con el objeto de introducirse en la difracción aplicada a materiales biológicos. En 1933 se trasladó al MIT (Massachusetts Institute of Technology) en donde, a través de su amistad con el matemático Norbert Wiener, profundizó sobre la teoría de Fourier y especialmente sobre las propiedades de la transformada de Fourier (transformación entre dos espacios) y su convolución (operador entre dos funciones). Y así fue como, en 1934, nació su fórmula (**Fig. 28**), la función de Patterson $[P(uvw)]$, que elegantemente abría grandísimas expectativas para la resolución de las estructuras cristalinas. El gran éxito de la función de Patterson es que eliminó la necesidad del conocimiento de las fases relativas entre los haces difractados, pero sin embargo introducía

la complicación de desentrañar el conjunto de distancias interatómicas y transformarlo en las posiciones relativas de los átomos, es decir, el paso de la información del dibujo de la derecha de la

Fig. 29 hasta el dibujo de la

izquierda. Sin embargo, debido a la precariedad tecnológica del momento para poder abordar sumas como las implicadas en su función, hubo que esperar algunos años hasta que su descubrimiento pudiera hacerse efectivo para resolver, indirectamente, el problema de las fases. Arthur Lindo Patterson falleció súbitamente, a causa de una hemorragia cerebral, en noviembre de 1966.

$$P(uvw) = \frac{1}{V} \sum \sum \sum |F(hkl)|^2 \cos 2\pi(hu+kv+lw)$$

Fig. 28. Función de Patterson. Obsérvese, en comparación con la fórmula de la Fig. 18, que en esta función ha desaparecido la incógnita de las fases, $\Phi(hkl)$, aunque obviamente la información que proporciona esta ecuación ya no es la posición de los átomos, sino sus distancias.

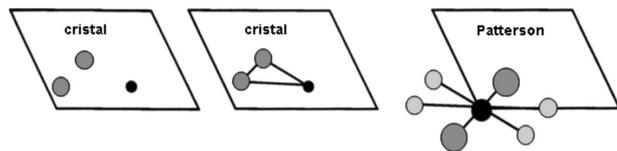


Fig. 29. Comparación entre la información que proporciona la función de densidad electrónica (izquierda) y la función de Patterson (derecha).

Al margen de la dificultad práctica que suponía el cálculo de la función aportada por Arthur L. Patterson, ya se vislumbraban las dificultades que reportaría la interpretación de dicha función para el caso de estructuras complejas. Al menos así era, hasta que, en 1935, David Harker (1906-1991), un «aprendiz de cristalógrafo», se diera cuenta de una circunstancia especial que facilitaba significativamente la interpretación de la mencionada función, ¡situación de la que Arthur L. Patterson no había sido consciente!

David Harker^[10] (**Fig. 30**) nació en California, graduándose en 1928 como químico en Berkeley. En 1930 aceptó un trabajo como técnico de laboratorio en uno de los laboratorios de la empresa Atmospheric Nitrogen Corp. en el estado de Nueva York, y en donde, a través de la lectura de artículos relacionados con estructuras de cristales de varios compuestos, nació su interés por la Cristalografía. Pero por culpa de la gran depresión económica, en 1933 perdió su trabajo y regresó a California, en donde utilizando algunos ahorros pudo entrar en el Instituto de Tecnología de California y, bajo la supervisión de Linus Pauling, comenzó a practicar en la resolución de algunas estructuras de compuestos simples. Durante una de las charlas semanales del laboratorio de Pauling se presentó la función que recientemente había introducido Arthur L. Patterson y allí fue en donde Harker fue consciente de la dificultad que supondría abordar el cálculo, y especialmente la resolución (interpretación), de una función de este tipo en estructuras con un gran número de átomos. Según contó él mismo, algunas noches después de la charla mencionada, se despertó súbitamente durante la noche y exclamó ¡tiene que funcionar! En efecto, Harker hizo patente el hecho de que la función de Patterson contiene acumulaciones de máximos, en determinadas zonas de ese espacio de Patterson y que son consecuencia de los vectores entre átomos relacionados entre sí por elementos de simetría, y por lo tanto cualquier vestigio de vector interatómico (entre parejas de átomos relacionados por simetría) habría que buscarla en dichas zonas, y no en todo el espacio de la celdilla del espacio de Patterson, lo cual simplificaba cualitativamente la interpretación.

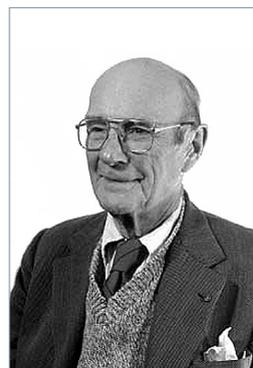


Fig. 30. David Harker (1906-1991).

Desde 1936 hasta 1941 Harker obtuvo un puesto de profesor de química-física en la Universidad Johns Hopkins, en donde aprendió Cristalografía clásica y Mineralogía. Durante los restantes años de la década de 1940 obtuvo un puesto de investigador en la compañía General Electric y desde allí, junto con su colaborador John S. Kasper hizo otra de sus espléndidas contribuciones a la Cristalografía, las desigualdades de Harker-Kasper, la primera contribución a los denominados mé-

todos directos para la resolución del problema de las fases. En la década de 1950 aceptó el ofrecimiento de Irwin Langmuir para incorporarse al Brooklyn Polytechnic Institute para dedicarse a la resolución de la estructura de la ribonucleasa, lo que permitió plantear la metodología que años más tarde (1962) sería usada por Max Perutz y John Kendrew en la resolución de la estructura de la hemoglobina. En 1959 Harker trasladó su equipo y proyecto de la ribonucleasa al Roswell Park Cancer Institute y concluyó la estructura en 1967. En 1976 se retiró oficialmente, pero permaneció de algún modo activo en la Medical Foundation of Buffalo, hoy Hauptman-Woodward Institute, hasta su fallecimiento, en 1991, a causa de una neumonía.

«Andante», con partitura de John D. Bernal, el centro de gravedad

Tras los hallazgos de Arthur Lindo Patterson y David Harker, se disparó el interés por la estructura de las moléculas, especialmente las relacionadas con la vida: las proteínas. Y en este movimiento tuvo mucho que ver un irlandés, afincado en Inglaterra, John Desmond Bernal (1901-1971), que sin lugar a dudas hizo de «centro de gravedad» para un conjunto de personajes decisivos para el desarrollo ulterior de la Cristalografía.

La familia Bernal, de origen judío sefardí, llegó desde España a Irlanda en 1840 y se convirtió al catolicismo, ambiente en el que creció John D. Bernal, aunque lentamente fue alejándose de la religión y en su madurez se manifestó como ateo. La revolución rusa de 1917 influyó mucho en Bernal, que llegó a ser un activísimo miembro del Partido Comunista británico. John se graduó en 1919 en Mineralogía y Matemáticas (aplicadas a la simetría) en la Universidad de Cambridge. En 1923 obtuvo un puesto de ayudante en el laboratorio de W.H. Bragg de la Royal Institution en Londres y en 1927 regresó a Cambridge como profesor, en donde pronto recibió de sus alumnos del Laboratorio Cavendish el apelativo cariñoso de «el sabio». Desde allí ilusionó también en el campo de la cristalografía de las macromoléculas a muchos investigadores del King's College y del Birbeck College y en 1937 obtuvo una plaza de profesor en este último College de Londres, lugar en donde también obtuvieron su formación una parte de los cristálografos aventajados de la época. Sin duda, a John D.

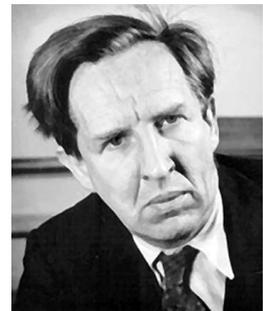


Fig. 31. John Desmond (1901-1971).

Bernal^[11] (**Fig. 31**) le corresponde un lugar prominente en la Ciencia del siglo XX. Demostró que, en condiciones adecuadas, un cristal de proteína podía mantener su cristalinidad al exponerlo a los rayos X, y algunos de sus estudiantes fueron capa-

ces de resolver estructuras tales como la hemoglobina y otros materiales biológicos de importancia, de tal modo que el análisis cristalográfico comenzó a revolucionar la Biología. John, fallecido a los 70 años, fue también el motor de estudios cristalográficos sobre virus y, junto con su colaborador Isidor Fankuchen, obtuvo los primeros diagramas de difracción de algunos de ellos.

Uno de los primeros ejemplos de la atracción que generó Bernal fue el caso de Max Ferdinand Perutz^[12] (1914-2002), **Fig. 32**. Nacido en Austria en una familia dedicada a la industria textil, en 1932 Perutz se matriculó en la licenciatura de química en la Universidad de Viena y descontento con lo que él denominó una pérdida de tiempo dedicada al análisis inorgánico, decidió que su vida estaba en la bioquímica que parecía desarrollarse en

Cambridge, y con la ayuda económica familiar en 1936 se incorporó al grupo de John D. Bernal en el Laboratorio Cavendish con el objeto de comenzar su tesis doctoral. Su relación con Lawrence Bragg fue también decisiva, y ya en 1937 realizó los primeros experimentos de difracción en cristales de hemoglobina que había podido cristalizar en el Instituto de Biología Keilin Molteno, de tal modo que se puede afirmar que Perutz (y su bicicleta) hicieron el primer nexo real entre la Física, que representaba el Laboratorio Cavendish, y la Biología. La invasión de Austria dejó la economía familiar de Perutz totalmente exhausta. Sin embargo, a partir de enero de 1939, Max pudo sobrevivir gracias a una beca de la Fundación Rockefeller y un puesto de ayudante en el laboratorio del joven Lawrence Bragg. En 1945 se renovaron sus expectativas gracias a una beca de Imperial Chemical Industries Research y ya en 1947 fue nombrado director de la Unidad de Biología Molecular del recién creado Medical Research Council.

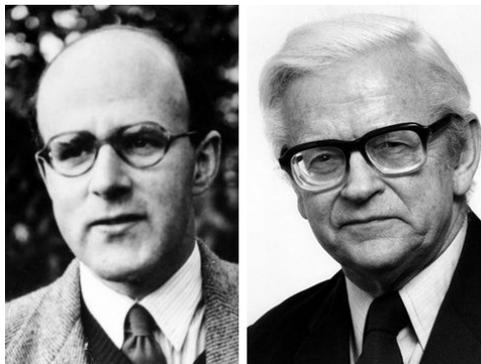


Fig. 32. Izquierda: Max F. Perutz (1914-2002).
Derecha: John C. Kendrew (1917-1997).

entre la Física, que representaba el Laboratorio Cavendish, y la Biología. La invasión de Austria dejó la economía familiar de Perutz totalmente exhausta. Sin embargo, a partir de enero de 1939, Max pudo sobrevivir gracias a una beca de la Fundación Rockefeller y un puesto de ayudante en el laboratorio del joven Lawrence Bragg. En 1945 se renovaron sus expectativas gracias a una beca de Imperial Chemical Industries Research y ya en 1947 fue nombrado director de la Unidad de Biología Molecular del recién creado Medical Research Council.

John Cowdery Kendrew^[13] (1917-1997), **Fig. 32**, nacido en Oxford y graduado en Química en 1939, en el Trinity College de Cambridge, fue otro ejemplo de la atracción de Bernal, cuya influencia personal le indujo a trabajar en la estructura de las proteínas y en 1946 ingresó en el Laboratorio Cavendish, colaborando con Max Perutz bajo la dirección de Lawrence Bragg. Se doctoró en 1949 y junto a Perutz formaron las «únicas fuerzas vivas» de la Unidad de Biología Molecular del entonces recién creado (1947) Medical Research Council. Aunque los trabajos de Kendrew se centraron fundamentalmente en la mioglobina, Max Ferdinand Perutz y John

Cowdery Kendrew (**Fig. 32**) recibieron el Premio Nobel de Química de 1962, por sus trabajos sobre la estructura de la hemoglobina y fueron los primeros en usar con éxito una excelente técnica que, para resolver indirectamente la ecuación de la **Fig. 18**, había sido previamente introducida por David Harker.

Otro de los grandes personajes de la época, que sin lugar a dudas también se gestó alrededor de la influencia directa de John D. Bernal, fue la controvertida e infortunada londinense Rosalind Elsie Franklin (1920-1958). Aunque existen multitud de textos referentes a la vida de Rosalind, quizá merezca la pena consultar estos enlaces: (<http://1.usa.gov/M9rte9>) y (<http://bit.ly/MYVWYC>), porque hacen justicia a su persona y a su corta, aunque fructífera y no reconocida labor, en la ciencia de mediados del siglo XX^[14]. Rosalind (**Fig. 33**) se doctoró en 1945 en la Universidad de Cambridge y, tras pasar tres años (1947-1950) en París, en el Laboratoire de Services Chimiques de L'Etat, se incorporó en 1951 como asociada de John Randall al King's College de Londres. Desde el laboratorio de Randall, Rosalind cruzó su trayectoria con la de Maurice Wilkins (1916-2004), ya que ambos estaban dedicados al estudio del ADN.

Lamentablemente, la competencia, desleal hasta niveles incomprensibles, la llevó a un conflicto permanente con Wilkins que finalmente le «pasó factura»..., ya que en ausencia de Rosalind, Wilkins (**Fig. 35**) mostró los diagramas de fibra del ADN (**Fig. 34**, izquierda) que Rosalind había obtenido, a dos jóvenes sin demasiados escrúpulos..., James Watson y Francis Crick (**Fig. 36**). Los diagramas de difracción obtenidos por Rosalind (**Fig. 34**, izquierda) fueron bautizadas por Bernal como las fotos de rayos X más bellas hasta entonces obtenidas, y sirvieron para el establecimiento de la estructura doblemente helicoidal del ADN (**Fig. 34**, derecha). Rosalind murió muy prematuramente, a los 37 años,



Fig. 33. Rosalind E. Franklin (1920–1958).

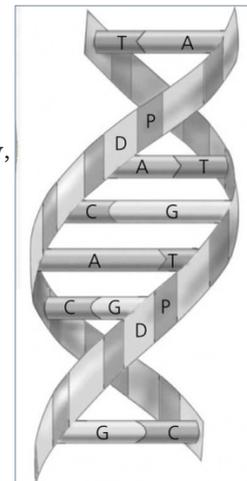
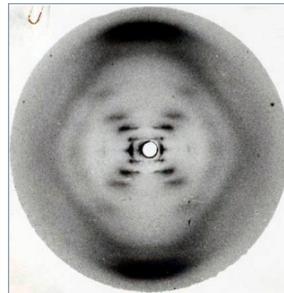


Fig. 34. Izquierda: Diagrama de difracción de una fibra de ADN, obtenido por Rosalind E. Franklin. Derecha: Esquema de la estructura en doble hélice del ADN.

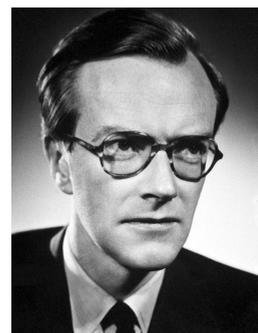


Fig. 35. Maurice Wilkins (1916–2004).

a causa de cáncer de ovario. En relación con esta desafortunada historia, Maurice Wilkins, James Watson y Francis Crick recibieron el Premio Nobel de Fisiología o Medicina en 1962, olvidando la decisiva influencia de los resultados de Rosalind Franklin.

Maurice Wilkins^[15] (1916-2004), **Fig. 35**, nacido en Nueva Zelanda, se licenció como físico en 1938, en el St. John's College de Cambridge, fecha en la que se incorporó con John Randall a la Universidad de Birmingham. Tras obtener su doctorado en 1940, se incorporó al proyecto Manhattan en California. Tras la Segunda Guerra Mundial, en 1945, volvió a Europa en donde John Randall organizaba los estudios de biofísica en la Universidad de St. Andrew en Escocia. Un año más tarde obtuvo una plaza en el King's College de Londres y en el entonces recién creado Medical Research Council, en donde llegó a ser Vicedirector en 1950.

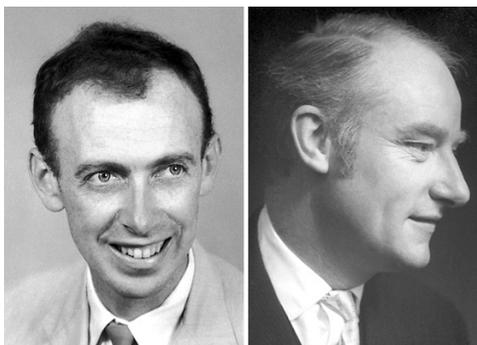


Fig. 36. Izquierda: James Watson (1928-)
Derecha: Francis Crick (1916-2004).

James Watson^[16] (1928-), **Fig. 36**, nació en Chicago, y en 1950 obtuvo su título de doctor en Zoología por la Universidad de Indiana. Pasó un año en Copenhagen como becario Merck y durante un simposio celebrado en 1951, en Nápoles, conoció a Maurice Wilkins, quien despertó su interés por la estructura de las proteínas y de los ácidos nucleicos. Gracias a la intervención de su director de tesis (Salvador E. Luria) Watson consiguió, en el mismo 1951, un puesto para trabajar con John Kendrew en el Laboratorio Cavendish, en donde conoció a Francis Crick. Tras dos años en el Instituto Tecnológico de California, Watson regresó en 1955 a Inglaterra para trabajar, un año más, en el Laboratorio Cavendish con Crick. En 1956 ingresó en el Departamento de Biología de Harvard.

Francis Crick^[17] (1916-2004), **Fig. 36**, nació en Inglaterra y estudió Física en Londres, en el University College. Durante la guerra trabajó en el Almirantazgo Británico, dejándolo posteriormente para estudiar Biología y aprender los principios de la Cristalografía con W. Cochran. En 1949, mediante una beca del Medical Research Council, se incorporó al laboratorio de Max Perutz, en donde, en 1954, concluyó su tesis doctoral. Y allí conoció a James Watson, quien posteriormente influiría definitivamente en su carrera. Sus últimos años los pasó en el Salk Institute for Biological Studies en California.

Dorothy Hodgkin^[18] (1910-1994), **Fig. 37**, nació en el Cairo por circunstancias familiares y pasó también parte de su juventud en Sudán e Israel, en donde su padre llegó a ser director de la Escuela Británica de Arqueología en Jerusalem. Desde 1928 hasta 1932 se instaló en Oxford gracias a una beca del Sommerville College, en donde aprendió Cristalografía y los métodos de difracción, y pronto se sintió atraída por el personaje y los trabajos de John D. Bernal, de tal modo que en 1933 ya estaba en Cambridge, explorando bajo la tutela de Bernal, un conjunto de problemas de interés. En 1934 se volvió a trasladar a Oxford de donde nunca salió, excepto por cortos periodos de tiempo. En 1946 obtuvo un puesto como profesora asociada en Cristalografía y aunque estuvo inicialmente ligada a la Mineralogía, pronto sus trabajos se encaminaron hacia el campo que siempre le interesó y que había aprendido con John D. Bernal, los esteroides y otras moléculas interesantes desde el punto de vista biológico. Tomó parte activa en la fundación de la Unión Internacional de Cristalografía. Sus trabajos sobre las estructuras de compuestos de mucha complejidad para la época, como la penicilina, cefalosporina, y vitamina B12, entre otros, la hicieron merecedora del Premio Nobel de Química en 1964.



Fig. 37. Dorothy Hodgkin (1910-1994).

«Finale», aunque con melodía inacabada...

No se puede concluir esta historia sin hacer mención a los esfuerzos realizados por muchos cristalógrafos que durante muchos años han tratado de resolver el problema de las fases mediante alternativas diferentes a las que proporciona la metodología de Patterson (**Figs. 28 y 29**), es decir, tratando de abordar el problema directamente desde las intensidades del espectro de difracción y basándose en ecuaciones de probabilidad: los llamados «métodos directos», en donde hay tres personajes cuya contribución no podemos olvidar.



Fig. 38. De izquierda a derecha, Herbert A. Hauptman (1917-2011), Jerome Karle (1918-) e Isabella Karle (1921-).

Herbert A. Hauptman^[19] (1917-2011), **Fig. 38**, nacido en Nueva York, se graduó en 1939, como matemático, en la Universidad de Columbia. Su colaboración con Jerome Karle comenzó en 1947 en el Naval Research Laboratory de Washington DC, y obtuvo su doctorado en 1954. En 1970 se incorporó al grupo de cristalógrafos de la Medical Foundation en Buffalo, de donde llegó a ser director de investigación en 1972.

Jerome Karle^[20] (1918-), **Fig. 38**, también neoyorquino, estudió matemáticas, física, química y biología, obteniendo el grado de maestría en Biología por la Universidad de Harvard en 1938. En 1940 se trasladó a la Universidad de Michigan, en donde conoció y se casó con Isabella Lugosky. Trabajó en el proyecto Manhattan en la Universidad de Chicago y obtuvo el grado de doctor en 1944. Finalmente, en 1946, se trasladó al Naval Research Laboratory de Washington DC, en donde conoció a Herbert Hauptman. La monografía publicada por Hauptman y Karle en 1953, *Solution of the Phase Problem I. The Centrosymmetric Crystal*, contenía ya las ideas más importantes sobre los métodos probabilísticos que, aplicados al problema de las fases, les hicieron merecedores del Premio Nobel de Química en 1985, pero no sería justo dejar de mencionar el papel de la esposa de Jerome, Isabella Karle^[21] (1921-), **Fig. 38**, quien también jugó un papel indiscutible, poniendo en práctica las ideas mencionadas.

Podríamos haber sido más amplios y detallados pero, por suerte, tras este «finale», la «música cristalográfica» sigue sonando. Con el desarrollo de muchas técnicas, entre las que cuenta la informática, esta disciplina^[22] ha desarrollado caminos muy exitosos para afrontar la resolución del problema que muestra la **Fig. 15** y la ecuación de la **Fig. 18**, con lo que sigue siendo una de las ramas científicas más potentes para el verdadero análisis estructural de la materia, la de mayor carácter multidisciplinar, uniendo diferentes áreas de investigación frontera. Directa o indirectamente, la Cristalografía y es la disciplina que ha generado el mayor número de Premios Nobel (28) a lo largo de la historia. Más aún, conscientes del papel que ha jugado (y juega) en el desarrollo de la Ciencia, la ONU en su Asamblea General A/66/L.51, hecha pública el 15 de junio de 2012, declaró 2014 Año Internacional de la Cristalografía^[23].

Es obvio que recientemente han aparecido otras técnicas físicas, tales como la microscopía electrónica de efecto túnel o la microscopía de fuerza atómica, capaces de visualizar imágenes de superficies a nivel atómico, pero sus niveles de resolución no alcanzan, ni de lejos, la que proporcionan los rayos X sobre los cristales.

Finalmente, el autor de este ensayo sobre el mundo de los átomos y de las moléculas, desea «estampar su firma» con una dedicatoria múltiple: a las maestras y maestros, y a todas aquellas que han hecho de la educación y de la enseñanza dirigida a «nuestras semillas», su razón de vivir, sin olvidar el esfuerzo silencioso que, en este sentido, el equipo de El CSIC y la Fundación BBVA en la Escuela vienen realizando desde hace muchos años. Vale.

Referencias bibliográficas

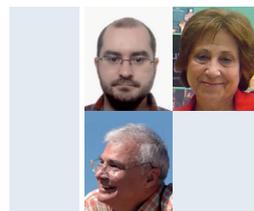
- [1] THOMSON, J.J. *Cathode Rays*. Philosophical Magazine. 44, 293. 1897.
- [2] NIELS BOHR, N. *On the Constitution of Atoms and Molecules*. Philosophical Magazine. 26, 1-25. 1913
- [3] PÉREZ-DORADO, I. et al. *Insights into pneumococcal fratricide from the crystal structures of the modular killing factor LytC*. Nature Structural & Molecular Biology 17, 576-582. 2010.
- [4] Biografía de WILHELM CONRAD RÖNTGEN, Nobel Foundation, [en línea]: <<http://bit.ly/MNWy4D>>, [consultada el 23/09/2012].
- [5] Biografía de MAX VON LAUE, Nobel Foundation, [en línea]: <<http://bit.ly/Mn1HTN>>, [consultada el 23/09/2012].
- [6] Obituario de PETER PAUL EWALD, web Cristalografía-Crystallography, [en línea]: <<http://bit.ly/OPkdWG>>, [consultada el 23/09/2012].
- [7] Biografía de WILLIAM HENRY BRAGG, Nobel Foundation, [en línea]: <<http://bit.ly/OUuCin>>, [consultada el 23/09/2012].
- [8] Biografía de WILLIAM LAWRENCE BRAGG, Nobel Foundation, [en línea]: <<http://bit.ly/OXII9n>>, [consultada el 23/09/2012].
- [9] Obituario de ARTHUR LINDO PATTERSON, web Cristalografía-Crystallography, [en línea]: <<http://bit.ly/LKwQz9>>, [consultada el 23/09/2012].
- [10] Biografía de DAVID HARKER, The National Academic Press, [en línea]: <<http://bit.ly/Rcy343>>, [consultada el 23/09/2012].
- [11] Biografía de JOHN DESMOND BERNAL, University College, Cork, [en línea]: <<http://bit.ly/RXz0Kt>>, [consultada el 23/09/2012].
- [12] Biografía de MAX FERDINAND PERUTZ, Nobel Foundation, [en línea]: <<http://bit.ly/qdl752>>, [consultada el 23/09/2012].
- [13] Biografía de JOHN C. KENDREW, Nobel Foundation, [en línea]: <<http://bit.ly/RRgGsI>>, [consultada el 23/09/2012].
- [14] Biografía de ROSALIND ELSIE FRANKLIN, [en línea]: <<http://1.usa.gov/M9rte9>> y <<http://bit.ly/MYVWYC>>, [consultada el 23/09/2012].
- [15] Biografía de MAURICE WILKINS, Nobel Foundation, [en línea]: <<http://bit.ly/OvHEEM>>, [consultada el 23/09/2012].
- [16] Biografía de JAMES WATSON, Nobel Foundation, [en línea]: <<http://bit.ly/HiSUjb>>, [consultada el 23/09/2012].
- [17] Biografía de FRANCIS CRICK, Nobel Foundation, [en línea]: <<http://bit.ly/SriVAF>>, [consultada el 23/09/2012].
- [18] Biografía de DOROTHY HODGKIN, Nobel Foundation, [en línea]: <<http://bit.ly/sK3SRW>>, [consultada el 23/09/2012].
- [19] Biografía de HERBERT A. HAUPTMAN, Nobel Foundation, [en línea]: <<http://bit.ly/VZMKbz>>, [consultada el 23/09/2012].
- [20] Biografía de JEROME KARLE, Nobel Foundation, [en línea]: <<http://bit.ly/QBWI24>>, [consultada el 23/09/2012].

[21] Biografía de ISABELLA KARLE, Nobel Foundation [en línea]: <<http://bit.ly/sMrK3K>>, [consultada el 23/09/2012].

[22] Web divulgativa del CSIC sobre la Cristalografía [en línea]: <<http://bit.ly/cantVe>>, [consultada el 23/09/2012].

[23] Declaración de la ONU: 2014, Año Internacional de la Cristalografía [en línea]: <<http://bit.ly/LPiyxb>>, [consultada el 23/09/2012].

La estructura de las revoluciones científicas y el caso especial de la óptica



Esteban Moreno Gómez*

El CSIC en la Escuela. VACC-CSIC

M.ª Carmen Refolio y José M.ª López Sancho

El CSIC en la Escuela. IFF-CSIC

Palabras clave

Luz, onda, partícula, Kuhn, revolución, aula, historia, ciencia.

Resumen

En este trabajo exponemos el esquema propuesto por Kuhn sobre la estructura de las revoluciones científicas y lo utilizamos para presentar el caso especial de la historia de la óptica, en lo que se refiere a los modelos corpuscular y ondulatorio. El objetivo es poner de manifiesto la coexistencia de dos teorías totalmente diferentes, la corpuscular y la ondulatoria, señalando la diferencia entre el proceso de sustitución de un modelo por otro, como en el caso de el universo de Ptolomeo por el de Copérnico, y el de convivencia de dos representaciones aparentemente incompatibles del mismo fenómeno. La paradoja de la doble naturaleza, la corpuscular de Newton (1704) y la ondulatoria de Young (1801) todavía persiste. De Broglie extendió en 1924 esta doble naturaleza a todas las partículas, con su teoría de onda asociada. En la actualidad la naturaleza de la luz es objeto de importantes trabajos de investigación.

Introducción: Paradigma y ciencia normal

En 1962 Kuhn publicó *The Structure of Scientific Revolutions*. En esta obra expuso su modelo de evolución de las ciencias, acomodándolo en cierta medida al esquema de evolución cognitiva de Piaget. De acuerdo con este esquema las ciencias avanzan por sustitución de un modelo, bien establecido y aceptado por la comunidad científica, por otro elaborado para explicar nuevos resultados experimentales. Para explicar estos cambios de modelo científico Kuhn necesita introducir algunos conceptos nuevos que analizaremos a continuación.

.....
* E-mai del autor: esteban@orgc.csic.es.

En primer lugar define lo que llama **paradigma**, idea difícil de exponer, pero que podemos identificar como el conjunto de creencias, preguntas y formas de ver la realidad que determinan los preconceptos y la manera de pensar que caracterizan una sociedad en un momento determinado de su historia.

Kuhn explica cómo concibió la idea de paradigma como un elemento importante en el desarrollo del pensamiento cuando leyó la Física de Aristóteles y comparó sus conceptos de movimiento, materia y forma con los de Galileo y Newton. Le resultó evidente que la manera de pensar de Aristóteles no era el origen de la de Galileo y ni siquiera se podía considerar como la misma ciencia, tan diferentes eran ambas concepciones del mundo.

Para aclarar el concepto de paradigma kuhniano, podemos imaginar que trasladamos a una persona culta (en el sentido de conocedor de su cultura) de un momento histórico a otro, por ejemplo de principios del siglo XVI al siglo XVII en Europa. Como habitante del siglo XVI, tiene una percepción del mundo totalmente aristotélica, es decir, la Tierra es el centro del universo, el hombre es de naturaleza distinta a la de los demás animales, la naturaleza manifiesta horror al vacío, la materia de la que están hechos los objetos no determina las propiedades de los mismos, etc., además de admitir la existencia de fuerzas sobrenaturales para hacer funcionar el sistema solar. En cambio, cien años después la Tierra queda relegada al papel de simple planeta, el cuerpo humano es semejante al de los demás animales, no existe ninguna propiedad mística como la del horror al vacío, las fuerzas aparecen obedeciendo a leyes naturales fijas y las características de los materiales fijan el comportamiento de los objetos. Además hay que añadir la valoración que se tenía de saber leer y escribir, la consideración social de la mujer, el grado de acatamiento de las doctrinas de la iglesia y del poder del rey, que también definen el esquema de valores reinante en cada momento histórico, etc.

De acuerdo con Kuhn el paradigma así definido forma un cuadro que enmarca el pensamiento de manera que ayuda a entender el mundo en el que se vive, pero que a la vez limita la creatividad impidiendo que se salga fuera de él. Kuhn piensa que este efecto limitador alcanza también a los científicos de la época, idea en la que se han centrado la mayor parte de las críticas a su modelo. Debemos darnos cuenta que el concepto de paradigma se refiere exclusivamente al aspecto intelectual de las personas, es decir, a lo que los informáticos actuales llamarían el *software*. Esto quiere decir que si pudiésemos transportar a un recién nacido desde la época prehistórica a la sociedad del siglo XVII que estamos estudiando y lo educásemos en esa sociedad, no podríamos hallar ninguna diferencia con los demás ciudadanos de la época, niños nacidos más de cinco mil años después.

Como todos sabemos en el periodo que tratamos se produjeron importantes cambios en la estructura social y el origen de la autoridad con la primera revolución burguesa de Cromwell. Un mundo poblado por seres sobrenaturales que convivían con las personas y cuya presencia nadie ponía en duda, fue cambiando a medida que la arquitectura evolucionaba del gótico, con la luz del sol coloreada por las vidrieras a los espacios mucho más abiertos y menos misteriosos construidos para las personas del renacimiento y del barroco. Los cambios en la música y literatura también se produjeron en el mismo sentido, de manera que una persona de principios del siglo XVI se encontraría *desplazada*, en un paradigma extraño, cuando se encontrara en el siglo XVII.

En la sociedad científica, el concepto de *paradigma* va unido al concepto de ***ciencia normal***. Esta idea se refiere al conjunto de teorías, de modelos que se manejan, de explicaciones que se consideran válidas, de instrumentos de observación y medida, de los problemas que se investigan y de las características de las interpretaciones que se admiten. Como ejemplo Kuhn presenta el caso del mundo científico pre-copernicano, donde el lector puede identificar los rasgos distintivos que conformaban el paradigma. Volviendo a nuestro ejemplo, los científicos de principios del XVI se planteaban cómo podían describir con más precisión los movimientos de los planetas, para lo cual sólo tenían una respuesta: aumentar el número de epiciclos, ecuantes y deferentes (**Imagen 1**). En realidad, como el lector ha adivinado, estos elementos actúan como términos en una serie de Fourier de funciones trigonométricas, con lo que la precisión con que se pueden describir los movimientos es, en principio, tan grande como se desee.

Este tipo de pensamiento vertical no permite salir del paradigma en vigor y por lo tanto solo puede producir *ciencia normal*.

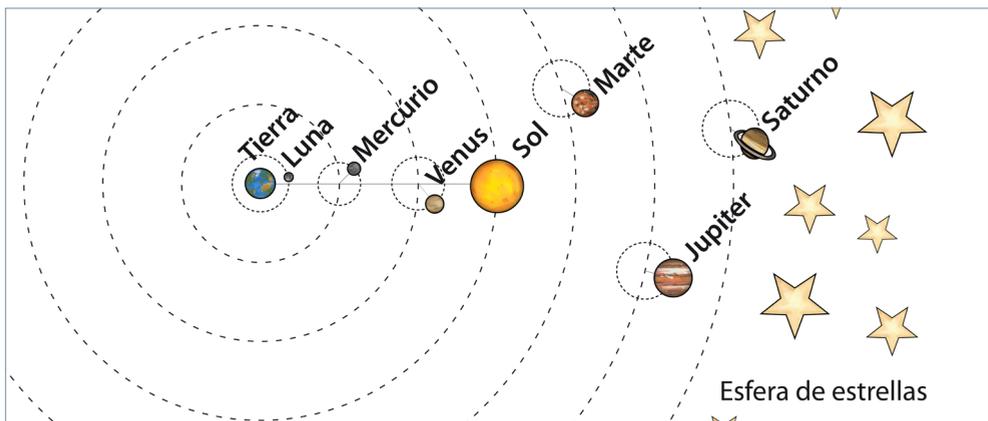


Imagen 1. Sistema de Ptolomeo modificado con epiciclos y deferentes.

La idea de la inconmensurabilidad

Podemos definir este término como el desequilibrio piagetiano que se produce cuando se descubren fenómenos imposibles de explicar dentro del paradigma de la ciencia normal, por mucho que se retoque el modelo. Este es el caso del descubrimiento de Galileo al estudiar las fases de Venus con su telescopio, ya que lo que observó no podía explicarse de ninguna manera con el esquema de Ptolomeo, por muchos epiciclos o ecuanetes que se añadiesen (**Imagen 2**). Así surge el concepto de **anomalía** como el resultado de una observación incompatible con un modelo o esquema.

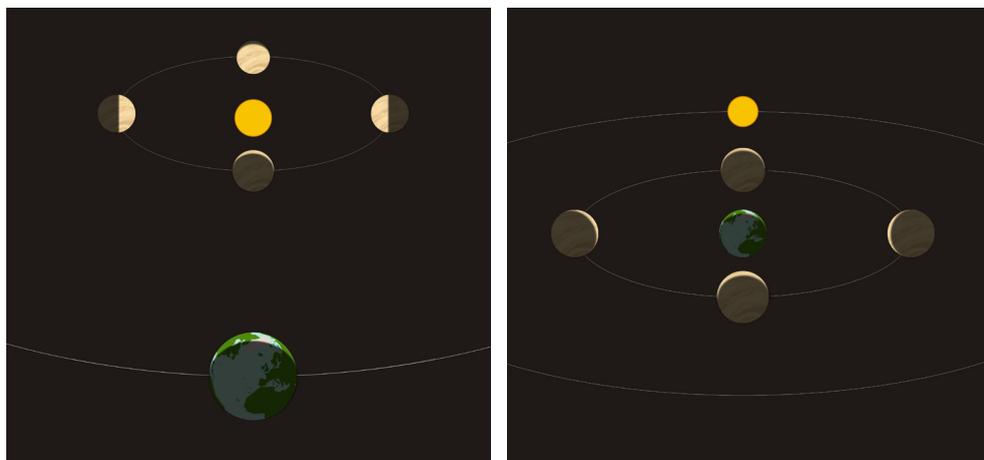


Imagen 2. Modelo Heliocéntrico y modelo geocéntrico.

Tres nuevos conceptos: **cambio de paradigma**, **revolución científica** e **inconmensurabilidad**. Cuando el número de *anomalías* va creciendo y se hace evidente la imposibilidad de explicarlas con el modelo imperante, por mucho que se fuerce, aparece la necesidad de cambiar de modelo. Cuando este cambio de modelo implica también **la modificación del paradigma** asociado decimos que se ha producido una **revolución científica**. Esto sólo ocurre cuando el modelo nuevo es esencialmente diferente al anterior, como lo son el geocéntrico y el heliocéntrico o el creacionismo y la evolución. En este caso Kuhn dice que los dos modelos son **inconmensurables**, como es el caso de la física de Aristóteles y la de Galileo que hemos citado antes.

Paul Feyerabend también utiliza el concepto de *inconmensurabilidad* entre teorías. Para este autor «dos modelos son inconmensurables cuando implican diferencias en la concepción de la naturaleza de la realidad». Así, el modelo en el que la masa

pueda transformarse en energía y la energía presente una masa es inconmensurable con el esquema de física clásica en el que ambas magnitudes son conceptualmente diferentes, con unidades distintas y distintos procesos de medida.

La historia de la óptica

Una vez presentado el esquema básico de Kuhn para modelizar las revoluciones científicas, vamos a repasar brevemente la parte de la historia de la óptica que se refiere a los modelos corpuscular y ondulatorio.

La propagación de la luz por el espacio es un fenómeno muy interesante, que fascina tanto a los niños como a los adultos. Es el principal medio por el que los seres humanos percibimos el mundo real en el que estamos inmersos, tanto el próximo como el que nos aporta información de la Luna, el Sol y el resto del universo. Además es muy sencillo experimentar con la luz, fácil de producir y de manipular, y las características elementales se deducen a partir de medidas tan sencillas como distancias y ángulos.

Aunque el mundo real se compone de espacio y tiempo, masa y energía e información, la óptica se estudia en sus comienzos como un fenómeno de propagación instantánea en el espacio. Esto se debe a que las velocidades que intervienen son tan elevadas que sólo es posible medirlas en el laboratorio a partir del siglo XIX, aunque se habían estimado indirectamente dos siglos antes.

El primero que describe la propagación de la luz introduciendo un modelo es Euclides, hacia el año 300 a.C. En el modelo de Euclides la luz se define como una *cosa* (en el sentido que le da Wittgenstein: algo que existe realmente), que puede presentar atributos o adjetivos, que refleja una propiedad de la luz (como la intensidad o el color), y que es capaz de realizar actos (acciones que se representan por verbos) como iluminar, propagarse, reflejarse, etc. Además, la naturaleza y propiedades de la luz son independientes de la fuente de la que provenga, ya se origine en el Sol, en la Luna, las estrellas, las luciérnagas, un fuego de leña o una lámpara de aceite. Esta característica es el resultado de numerosos experimentos, que nunca hallaron una propiedad que diferenciase los tipos de luz por las propiedades de su origen. Cuando los seres humanos transportaron por primera vez un fuego al interior de una cueva vieron, maravillados, que aparecía ante sus ojos una realidad que había estado oculta, que se reflejaban en el agua del lago interior y en la mica de las rocas y que todo aquel espectáculo desaparecía tan pronto como la hoguera se apagaba. Además cualquier objeto, si se calentaba lo suficiente, era capaz de emitir luz, lo que indica la existencia de una relación entre el calor y la luz.

Con Euclides nace el modelo de rayos, con los que se pueden entender los fenómenos de propagación y reflexión (**Imagen 3**).

Es fácil adivinar que la geometría de Euclides (compendio de sus propios descubrimientos así como de los conocimientos anteriores) se basa en el comportamiento de los rayos, que sin duda le inspiraron los conceptos de punto, línea y ángulo.

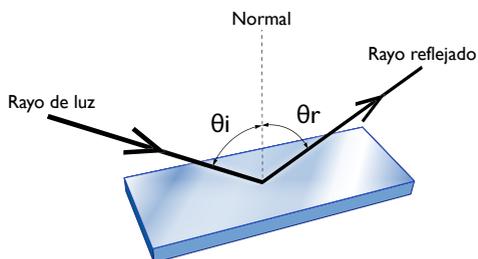


Imagen 3. Modelo de rayos aplicado a la reflexión de la luz en un espejo.

Por medio del modelo de rayos se pueden explicar fácilmente observaciones complicadas, como la formación de imágenes en espejos planos o en la superficie del agua (**Imagen 4**).

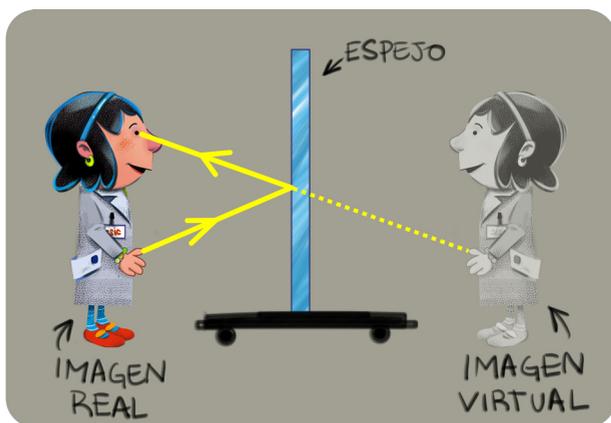


Imagen 4. Modelo de rayos aplicado en el reflejo de un objeto. A la derecha Narciso de François Lemoyne (1688-1737).

También puede aplicarse el modelo para explicar la producción de sombras y sus características de tamaño y forma (**Imagen 5**). Como se transmite en forma de rayos que coinciden con líneas rectas se pueden aplicar todas las propiedades y teoremas de la geometría. Esto permite no solo entender lo que ocurre,

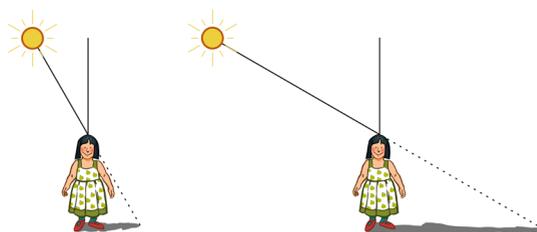


Imagen 5. Modelo de rayos aplicado a la producción de sombras.

sino predecir cómo se va a comportar la luz antes de haber realizado el experimento o la observación.

En primer lugar podemos utilizar un objeto cualquiera, un monigote de cartón, por ejemplo, para estudiar lo que ocurre cuando lo situamos frente a una pared iluminada por el Sol.



Imagen 6. Actividad para asimilar el modelo de rayos.

Inicialmente, antes de colocar nuestro monigote, la luz emitida por el Sol, tras viajar por el espacio, llega a la pared del colegio y la ilumina, se refleja en ella y parte entra en nuestros ojos, produciendo en nuestro cerebro la imagen de la pared iluminada.

Cuando situamos nuestro monigote entre el Sol y la pared, parte de la luz del Sol incide sobre el monigote y lo ilumina; la luz que incide en él se refleja y es captada en parte por nuestros ojos, produciéndose así la imagen del muñeco en nuestro cerebro.

Si estudiamos la situación atentamente veremos que la parte de luz solar interceptada por el monigote no ha podido llegar a la pared, provocando en ella una parte oscura, una sombra igual a la forma del muñeco.

Además, la forma de la sombra es independiente de la situación del observador, es decir, de nuestros ojos, y depende solamente de la posición del muñeco de cartulina respecto al Sol. Es fácil comprobar que la forma de la sombra depende exclusivamente de la manera en la que el monigote interfiere la luz solar, variando dicha forma desde una copia exacta del monigote hasta convertirse en una línea del grosor del cartón, cuando está de perfil. Este hecho, convenientemente estudiado y comprobado por los alumnos bajo la dirección del profesor, debe servir para estudiar las características de la proyección de un objeto de tres dimensiones sobre un plano.

Podemos humanizar más el muñeco realizando dos perforaciones en el lugar de los ojos, observando que la luz pasa por las dos perforaciones y rompe la sombra con dos zonas iluminadas en la pared (**Imagen 6**).

Conviene tener en cuenta que el modelo de producción de sombras es la base de las medidas del radio de la Tierra, utilizando el modelo de Tierra redonda y los cálculos posibles gracias a la geometría euclidiana.

Así lo hizo Eratóstenes, que sabía que el 21 de Junio (solsticio de verano), en Siena, el Sol iluminaba el agua de los pozos, por muy profundos que fuesen y los edificios no proyectaban sombra alguna. Esto implicaba que el Sol se encontraba exactamente en la vertical de la ciudad.

En cambio, en Alejandría, situada a unos 800 kilómetros más al Norte, ese mismo día un mástil clavado en el suelo proyectaba una sombra apreciable. Cuando llegó en 21 de junio Eratóstenes midió el ángulo que formaban los rayos del Sol con la vertical, que resultó ser de 7,2 grados (**Imagen 7**).

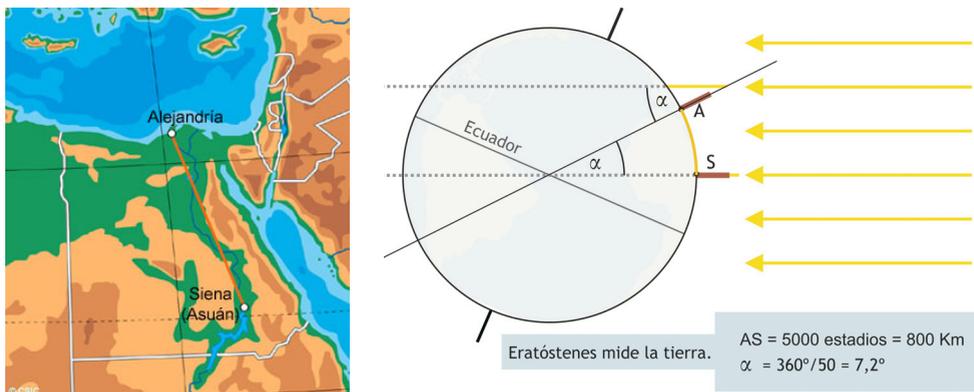


Imagen 7. Medida de Eratóstenes: situación de las ciudades y medida de la inclinación de los rayos solares.

Además mandó medir la distancia entre Siena y Alejandría, que suponía situadas en el mismo meridiano, y resultó que distaban unos 800 kilómetros (5000 estadios). Con esos datos y aplicando el modelo de Tierra aristotélico, es decir, suponiendo que:

1. La Tierra es perfectamente esférica.
2. El Sol se encuentra tan alejado que sus rayos podían considerarse paralelos.

Es fácil calcular la longitud de la circunferencia de la tierra por una simple proporción:

- Si a una distancia de 800 kilómetros le corresponde un ángulo de 7,2 grados, a la longitud total del meridiano le corresponderán 360 grados.
- De donde resulta que el radio del planeta es de 6.366,18 kilómetros, medida muy aceptable para la época.

También, utilizando el modelo de luz de Euclides podemos explicar la existencia del día y la noche y se puede calcular el tamaño de la Luna a partir de las dimensiones

de la sombra de nuestro planeta proyectada sobre la Luna durante los eclipses, y su distancia a nuestro planeta utilizando una moneda y aplicando las propiedades euclidianas de los triángulos semejantes (**Imagen 8**).

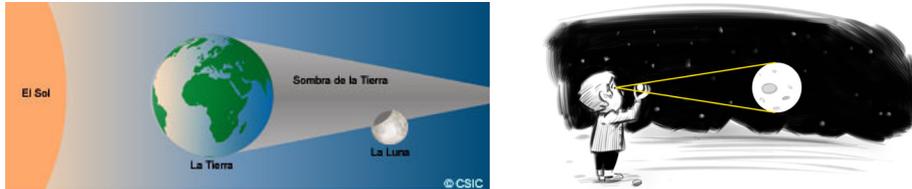


Imagen 8. Tamaño de la luna y su distancia a la tierra aplicando el modelo de rayos.

Todas estas determinaciones las realizaron los griegos poco después de que Euclides publicara su compendio de geometría. A partir de entonces, en tiempos de Aristóteles y Alejandro Magno, siempre irán unidas la óptica y la geometría.

Unos ciento cincuenta años después Ptolomeo estudia los fenómenos de refracción, también utilizando la óptica de rayos, aunque no llega a descubrir la ley a la que obedecen. Aunque conocía las matemáticas necesarias, los resultados de las medidas no eran suficientemente precisas o el paradigma de su época no era el apropiado para relacionar los senos de los ángulos con las propiedades de los materiales por los que se transmite la luz.

En los siglos X y XI, casi en tiempos de la vida del Cid, Alhazen estudió el aumento aparente de la imagen que producen las lentes, utilizando el modelo de rayos, lo que aumentó la valoración del modelo. Alhazen propone un modelo de ojo, basado en las observaciones de Galeno, explicando la función de cada uno de los elementos que realmente lo forman (**Imagen 9**).

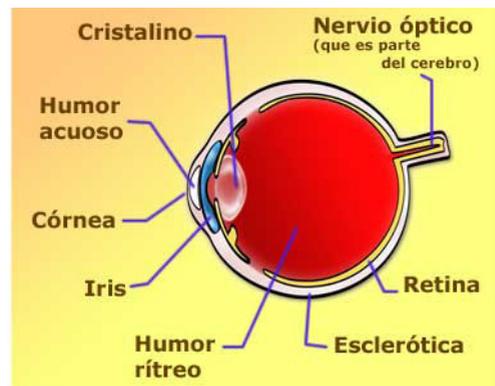


Imagen 9. Modelo de ojo y partes que lo componen.

Además Alhazen intuyó (por cierto, ¿qué es intuir?) que la luz no se propaga instantáneamente por el espacio, sino que lo hace con una velocidad finita.

Esta idea introduce un nuevo actor, el tiempo, en el escenario de la óptica. Pero estamos en plena Edad Media y la sugerencia permanecerá dormida hasta que no la despierte Galileo cuatro o cinco siglos después, ya en el Barroco.

En el siglo XIII, hacia 1220, Robert Grosseteste se interesa por una característica importante de la luz, el color. Hasta entonces se había supuesto que los distintos colores correspondían a rayos luminosos de naturaleza diferente, existiendo rayos rojos, verdes, azules o morados, pero Grosseteste, animado de un espíritu unificador siempre presente en los seres humanos, intenta simplificar las propiedades de la luz suponiendo, **erróneamente**, que el color es una sensación que se debe a la diferente respuesta el ojo a la intensidad del rayo. La intensidad nula o ausencia de luz correspondería al negro. Un rayo de intensidad débil produciría el violeta, aumentando la sensación al recibir rayos de intensidad creciente pasando por añil, azul, verde, amarillo, naranja y rojo. Si se aumenta aún más la intensidad del rayo lo veríamos blanco.

Poco después, hacia 1260, Roger Bacon estudia los efectos de las lentes y las imágenes que éstas forman cuando se mira a través de ellas, utilizando la combinación óptica de rayos-geometría, que se afirmaba así como el modelo aceptado para la luz. En 1300 un médico francés, Bernard de Gordon, inventa los anteojos correctores de miopía y presbicia que aparecen en obras pictóricas a partir de entonces (**Imagen 10**). Es un ejemplo de competencia, al aplicar el conocimiento contenido en el modelo de rayos a la resolución de problemas prácticos.

En 1604 Kepler (**Imagen 11**) elaboró un modelo óptico del ojo, como un instrumento óptico en el que la imagen formada por el cristalino y el resto del sistema óptico se proyectaba en la retina. Con este modelo explicó la miopía y la hipermetropía como defectos del poder de acomodación del cristalino, poniendo de manifiesto la utilidad de los modelos científicos.

Es fácil reproducir el modelo de Kepler del ojo, de una manera simplificada, utilizando una lupa (que hace el papel del cristalino) y una cartulina situada más alejada que el foco. Si oscurecemos la clase y proyectamos una imagen luminosa sobre una pantalla o la pizarra digital, nuestros alumnos verán la imagen invertida formada sobre su cartulina, que está situada en el lugar de la retina.



Imagen 10. Quevedo con anteojos. Retrato de Francisco de Quevedo y Villegas, Madrid, Instituto Valencia de Don Juan. (Juan Van der Hammen?). Tradicionalmente considerado copia de un retrato perdido de Velázquez.

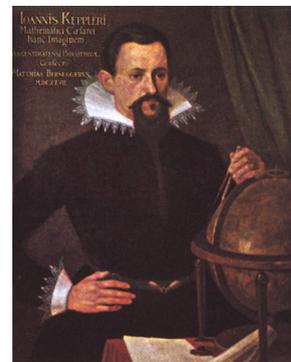


Imagen 11. Retrato de Johannes Kepler.

Kepler, además, determinó que la intensidad de la luz emitida por un cuerpo (energía por unidad de superficie) variaba inversamente proporcional al cuadrado de la distancia, lo cual es un importante indicador de que los rayos podían ser en realidad chorros de partículas. Como la superficie de una esfera aumenta con el cuadrado del radio y el número de partículas es constante, la intensidad tiene que disminuir con el cuadrado de la distancia.

A finales del siglo XVI Galileo Galilei construyó un telescopio astronómico, basándose en una receta para fabricar anteojos. Cuando lo dirigió al cielo (fue la primera persona que miró al firmamento con un instrumento óptico que aumentaba la capacidad de observación del ojo), observó que el Sol presentaba manchas oscuras en su superficie, lo que le permitió darse cuenta de que giraba sobre sí mismo. Además observó que la luna no era una esfera perfecta sino que más bien se parecía a una Tierra más pequeña, con sus valles y sus montañas, que Júpiter tenía cuatro satélites y que las fases de Venus no se podían explicar con el modelo de Ptolomeo. Más adelante se vio que en realidad había muchos más satélites girando en torno a Jupiter, pero los cuatro descubiertos por Galileo fueron suficientes para imponer la más importante revolución científica Kuhniana. Las naves Voyager completaron su estudio, pero ya en 1979. En la actualidad otras naves espaciales estudian el planeta dentro de un proyecto llamado, como no, proyecto Galileo y el nuevo sistema de posicionamiento global europeo lleva, también, su nombre.

Existen anteojos de Galileo que se venden a un bajo precio porque producen una imagen derecha y, por lo tanto, no necesitan prismas de inversión. Están formados por un objetivo convergente y un ocular divergente y los niños suelen pasar un rato agradable utilizándolos. De esta manera se dan cuenta de que los descubrimientos más importantes pueden reproducirse muy fácilmente, una vez que nos los explican.

Asimismo Galileo, basándose en la sugerencia de Alhazen, intentó determinar la velocidad de la luz, utilizando un método que era apropiado sólo para velocidades muy pequeñas. Se situó en montecillo con un farol y envió a un amigo a un monte cercano, en cuya cima se situó con un farol igual al de Galileo. Ambos habían acordado que cuando Galileo moviese su luz verticalmente procederían a cubrir sus linternas. A continuación Galileo descubriría la suya y comenzaría a contar el tiempo recitando la numeración con una cadencia aproximada de un segundo (para ello disponían de un péndulo, cuyo movimiento habían estudiado): uno, dos, tres; cuando la luz llegase a los ojos de su amigo éste destaparía su farol y Galileo dejaría de contar. Dividiendo el doble de la distancia entre ambos investigadores por el tiempo transcurrido hallarían la velocidad de propagación. Así lo hicieron, pero a

Galileo no le dio tiempo ni siquiera a comenzar su cuenta. Y así llegaron a la conclusión de que la velocidad era, como mínimo, muy elevada para poderla determinar por ese procedimiento.

Es fácil repetir el experimento en el colegio, si se quiere que los alumnos tengan una experiencia directa de un experimento que no da los resultados para los que se diseñó (**Imagen 12**).



Imagen 12. Intento de medida de la luz por Galileo.

Así hemos llegado al siglo XVII, en un recorrido que comienza dos mil años antes y a lo largo del cual se ha asentado el modelo de rayos. Al revisar los hechos más relevantes de la óptica hemos experimentado una sensación propia de los historiadores: la de saber cuándo los científicos aciertan y cuándo se equivocan, no porque seamos más inteligentes sino simplemente porque sabemos más óptica que ellos. Pero no debemos olvidar que lo que hemos aprendido es, justamente, el resultado de sus trabajos de investigación.

Grimaldi y el modelo ondulatorio de la luz: La primera anomalía

Es difícil hacernos una idea del cambio producido en el mundo científico en sólo unos pocos años, desde la aparición del libro de Copérnico (*De Revolutionibus Orbium Coelestium* en 1543), y principios del siglo XVII, cuando comienza a investigar Grimaldi.

Como dijo Feynman muchos años después, los ángeles encargados de empujar a los planetas a lo largo de su órbita se habían quedado sin ocupación, sustituidos por fuerzas que tiraban de ellos hacia el Sol, en dirección perpendicular a la que ejercían los ángeles. Esas fuerzas, como las de cualquier otro tipo, se representaban ahora por flechas, utilizando el símbolo que había introducido Leonardo unos años antes. **El paradigma había cambiado (Imagen 13).**

Y en este nuevo ambiente intelectual nació y se formó Francesco María Grimaldi (1618-1663). Entre otras cosas estudió las dimensiones de las recién descubiertas montañas de la Luna.

Pero el descubrimiento que nos interesa aquí es el que se refiere a la primera observación que no se explica con el modelo de rayos: el resultado de pasar un haz de luz solar por una rendija muy fina, hecha perforando una cartulina con la punta de una cuchilla muy afilada. Aunque la publicación se realizó en 1665, suponemos que el experimento lo llevó a cabo hacia 1660, tres años antes de su muerte.

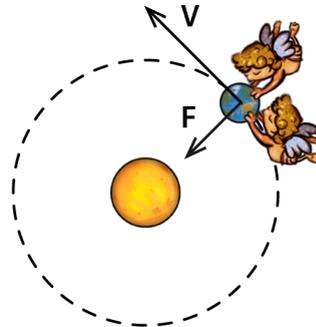


Imagen 13. «Los ángeles son sustituidos por fuerzas».

Podemos realizar este experimento con nuestros alumnos, sin más que practicar un corte muy delgado en una cartulina. Si hacemos pasar el haz de luz de un laser por la rendija y la proyectamos en una pared blanca, la figura que vemos no es la que predice el modelo de rayos, sino una serie de franjas claras y oscuras.

Así fue cómo Grimaldi encontró la primera *anomalía* que se oponía al modelo de rayos, ya que aplicando dicho modelo se predecía que el experimento de la rendija debía producir una franja luminosa única, pero nunca una serie de franjas paralelas (algunos historiadores de la ciencia piensan que Leonardo se había anticipado en el descubrimiento).

Además, el experimento es tan fácil de realizar que muy pronto se repitió en los laboratorios y los gabinetes de toda Europa, modificando la forma y el tamaño de las rendijas, aunque siempre debían mantenerse *pequeñas* (menores de una décima de milímetro). Grimaldi llamó al nuevo fenómeno *difracción* y lo explicó proponiendo que la luz estaba constituida por algo que ondulaba. Así, a mediados del siglo XVII nacía el modelo ondulatorio de la luz, apoyado también por Robert Hooke por esa misma época, aunque debemos puntualizar que ambos investigadores pensaban en ondas del mismo tipo que las del sonido, es decir, ondas longitudinales.

Respecto al concepto de difracción, introducido por Grimaldi, equivale exactamente al de interferencia y ambos términos se pueden utilizar indistintamente, tal como puntualizó Feynman en sus *Lectures on Physics*. Si se trata de dos fuentes se suele decir que existe interferencia y si el número de fuentes es muy elevado, como en una red, lo solemos llamar difracción.

Hasta el descubrimiento de la difracción por Grimaldi el modelo de corpúsculos propagándose en línea recta (rayos) constituyó la base de la *ciencia normal*, en el campo de la óptica. Esta primera anomalía inicia un periodo durante el cual los científicos se afanaron en encontrar una nueva teoría que explicase los fenómenos *normales* y, además, los de difracción. ¡La óptica ha entrado en crisis!

Newton unos años después, hacia 1666 (aunque lo publicó en 1704), estudió la dispersión de un rayo luminoso al pasar por un prisma. Un rayo de luz solar, limitado por una rendija practicada en las cortinas de su laboratorio se ensanchaba y daba lugar a una banda continua de colores que Newton dividió en siete bandas, los siete colores del arcoíris. Al conjunto de la banda de colores lo llamó *espectro* (**Imagen 14**).

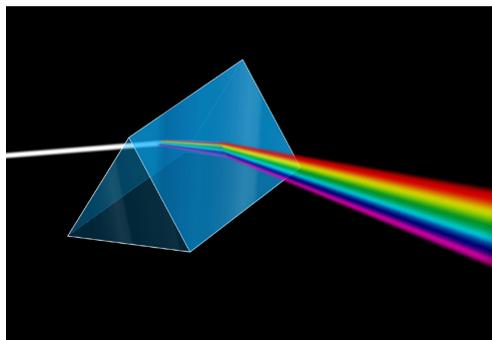


Imagen 14. Representación del espectro de colores obtenido por Newton.

Nosotros podemos repetir este experimento utilizando un proyector de diapositivas que reproduzca la rendija de luz del Sol y reproducirlo de la manera que se ha representado en la ilustración adjunta (**Imagen 15**).

Aunque él no lo sabía, el prisma y la pantalla sobre la que se proyectaba la luz constituían un instrumento nuevo, el espectroscopio, del que hablaremos más adelante.

Pero el hecho de que la luz se dispersase no constituía una anomalía importante para el modelo de rayos, aunque hubo que retocarlo. Puesto que una onda necesita para transmitirse un medio material que *ondule*, y la luz se transmite a través del espacio vacío como se había comprobado utilizando la bomba de Hooke o la cámara del barómetro de Torricelli.

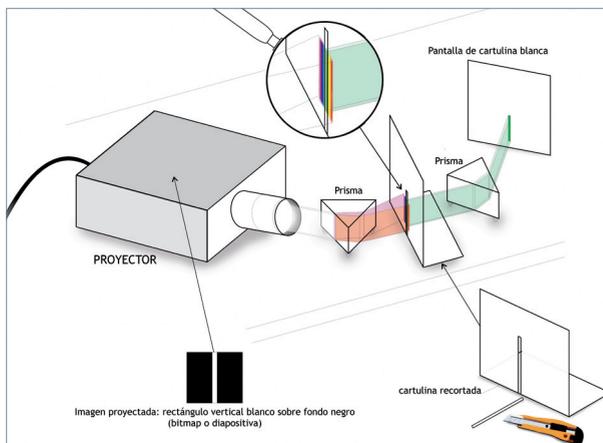


Imagen 15. Reproducción del experimento de Newton.

Newton rechazó el modelo ondulatorio y apoyó el corpuscular. Las partículas pueden transmitirse a través del vacío y viajar desde el Sol hasta la Tierra. Y redefinió el rayo de luz diciendo que estaba compuesto por un chorro de partículas (que luego se llamarían fotones) que se propagaban en línea recta y rebotaban elásticamente en la superficie de un espejo, como una bola de billar rebota en la banda de la mesa. Y para explicar la dispersión por el prisma bastaba admitir que había partículas de todos los colores del espectro, menos blancas. El blanco era la sensación que producían las partículas de los siete colores cuando llegaban a nuestro ojo.

El caso de la refracción era un poco más complicado, pero también se podía explicar con el modelo de partículas suponiendo que la velocidad de propagación de los fotones en los cuerpos transparentes era superior a la velocidad de la luz en el vacío o en el aire. En cambio la teoría ondulatoria requería que la velocidad de propagación de las ondas luminosas en un medio más denso que el aire fuese inferior a la velocidad con se desplazaba en el aire o el vacío.

Por esa razón la medida de la velocidad de la luz en los diferentes medios pasó a ser el *experimentus crucis*, es decir, el experimento que decidiría cual es la senda correcta en el cruce de los dos caminos, el del modelo corpuscular y el ondulatorio.

Y así, debido a la imposibilidad de que una onda material se propague sin un medio y al enorme prestigio de Newton, el modelo ondulatorio tuvo muchas dificultades para abrirse camino en las mentes de los científicos.

Continúan apareciendo anomalías

En 1669 Erasmus Bartholinus descubrió un fenómeno nuevo y espectacular; cuando se colocaba un cristal de espato de Islandia (calcita) sobre un papel con una línea dibujada la imagen de la línea se duplicaba (**Imagen 16**). Y si se giraba el cristal una imagen permanecía fija en tanto que la otra oscilaba en torno a la primera. La doble imagen que se forma se debe a un nuevo fenómeno llamado doble refracción o birrefringencia.

El rayo incidente se divide en dos rayos, uno llamado *ordinario*, que se comporta como lo haría el rayo refractado en cualquier cristal y produce la

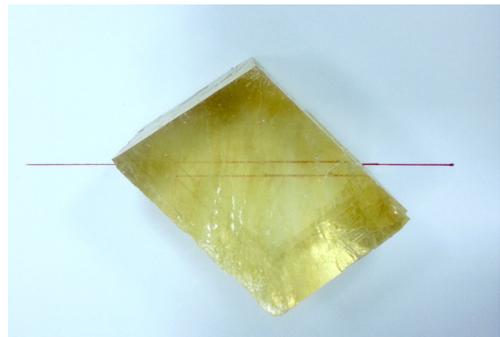


Imagen 16. Birrefringencia en calcita.

imagen inmóvil, y otro que recibe el nombre de *extraordinario*, que es el que cambia al girar el cristal y se mueve respecto al primero.

Para los seguidores de las dos teorías la explicación era la misma; los dos rayos viajaban por el espato con velocidades diferentes, con lo cual el ángulo de refracción era distinto dando lugar a la bi-refracción o birrefringencia. La única diferencia era que para los seguidores de Newton el rayo extraordinario era más rápido que el ordinario y para los partidarios de Huygens ocurría lo contrario. Al no poderse medir la velocidad de la luz en el espato existía razón para admitir una u otra teoría.

Si realizamos el experimento con nuestros alumnos veremos que entre las manipulaciones que llevan a cabo está, como hizo Batholinus, la de superponer dos cristales de espato y girar uno respecto a otro. El resultado de este experimento es difícil de explicar tanto dentro del modelo corpuscular como del modelo de ondas longitudinales, por lo que quedó en el limbo de las anomalías.

Pero, como hemos dicho, una de las ventajas que tenemos en este viaje por la historia de la óptica es que nosotros, al contrario de los que les ocurría a los descubridores, sí sabemos lo que sucede. Los dos rayos están polarizados en direcciones perpendiculares entre sí, propagándose el extraordinario a una velocidad inferior a la del ordinario. Pero para entender lo que hemos dicho hace falta adquirir algunos conceptos nuevos, lo que no se logró hasta la época de Faraday y Maxwell. Y sin esos conceptos es imposible explicar el proceso.

En 1656 tuvo lugar una de las aplicaciones prácticas de la ley del péndulo descubierta por Galileo hacia 1585. Basándose en ella Huygens diseñó un reloj con una precisión suficiente para utilizarse en los estudios astronómicos. Con este reloj se consiguieron mejores observaciones. En 1657 Huygens lo patentó y fue aplicado, casi inmediatamente, por los mejores fabricantes de relojes (sobre todo, en Londres), permitiendo que se pudiese determinar el tiempo por medio de un instrumento situado en el observatorio durante largos periodos de tiempo.

Unos diez años después, hacia 1676, Römer realizó el primer descubrimiento utilizando el reloj de Huygens. Observando el retraso en las apariciones de uno de los satélites de Júpiter (descubiertos por Galileo) determinó que la luz empleaba 22 minutos en recorrer el diámetro de la órbita terrestre (unos 300.000.000 km), de donde dedujo que la velocidad de la luz era del orden de los 270.000 kilómetros por segundo, lo cual es una buena estimación para la época (**Imagen 17**).

La determinación de la velocidad de la luz no inclina la balanza hacia una u otra teoría, aunque ya veremos que tiene importantes implicaciones en lo que se refiere al medio de propagación.

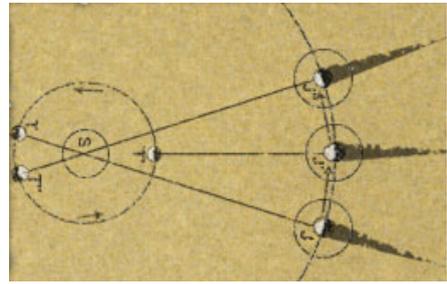


Imagen 17. Retrato de Römer por Johann Georg Wolfgang (1662-1744). Dibujo de Römer sobre el eclipse de Io por Júpiter.

Dos años después, en 1678, Huygens publica su modelo en el que presenta la luz como un fenómeno ondulatorio. Para entender el modelo de Huygens es necesario introducir dos conceptos nuevos, el de onda transversal y onda longitudinal, muy fáciles de entender.

Todos estamos habituados a la forma en que se pueden producir ondas transversales en una cuerda haciendo oscilar uno de sus extremos. El desplazamiento transversal se propaga a lo largo de la cuerda sin que haya desplazamiento de materia en esa dirección. Lo que ocurre es que se transmite energía de un extremo a otro de la cuerda, pero sin que exista propagación de materia (**Imagen 18**).

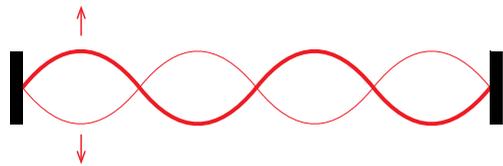


Imagen 18. Onda transversal.

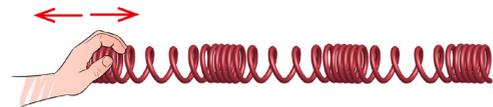


Imagen 19. Onda longitudinal.

Existen otro tipo de ondas, como las que son responsables de la propagación del sonido en el aire. Estas se producen cuando se comprime y se distiende un muelle sujeto por uno de sus extremos. En este caso lo que se propaga es un desplazamiento longitudinal de cada uno de los anillos del muelle y provoca la propagación de zonas de alta y baja presión que llegan sucesivamente al otro extremo del muelle o medio elástico (**Imagen 19**).

Con su modelo ondulatorio Huygens pudo explicar la reflexión y la refracción de la luz, así como el experimento de difracción de Grimaldi. Pero estos fenómenos eran explicables para el caso de ondas longitudinales como para el de ondas transversales, por lo que Huygens no pudo llegar a ninguna conclusión sobre la naturaleza de las ondas luminosas.

Así pues, el modelo ondulatorio explicaba todos los fenómenos conocidos salvo la propagación por el vacío y el modelo corpuscular explicaba la propagación por el vacío, la reflexión y la refracción, pero no podía justificar la difracción por una rendija.

En realidad el experimento de la doble refracción que Bartholinus observó en el espato de Islandia podría haber dilucidado el problema, ya que los dos rayos que aparecen en el cristal corresponden a dos ondas polarizadas, y sólo la ondas transversales pueden polarizarse. Pero ese descubrimiento lo realizó Étienne-Louis Malus hacia 1808, cuando Goya pintaba su Dos de Mayo, y nosotros nos encontramos todavía en 1678.

Así quedaron las cosas hasta 1752, año en el que Thomas Melvill utiliza el método del prisma de Newton para comparar, los colores en que se descompone un rayo de Sol, con los que resultan de la luz emitida por diversos metales cuando se introducen en la llama de un mechero. Para su asombro, cada metal emite una luz característica, en una serie de colores concretos y diferentes unos de otros, pudiéndose utilizar este procedimiento para identificarlos. Pero nadie pudo encontrar la razón. Quedaría para que Bohr y otros físicos del siglo XX elaborasen un modelo cuántico de átomo.

Además, este fenómeno se puede explicar con cualquiera de los dos modelos de luz existentes, por lo que no aportó nuevas pruebas al problema.

En 1801 aparece en escena Thomas Young, diseñando y realizando uno de los más famosos experimentos de la física: el experimento de las dos rendijas. Este experimento no es difícil de realizar en clase. Basta con hacer con una cuchilla dos cortes paralelos en una tarjeta de visita. Los dos cortes deben estar separados medio milímetro aproximadamente. Al iluminar la rendija con un rayo laser, preferiblemente verde o azul sobre la pared aparecerá la figura de interferencia más famosa en óptica (**Imagen 20**).



Imagen 20. Figura de interferencia.

La explicación que dio Young con su modelo de ondas es fácil de entender sumando amplitudes de las ondas generadas en cada una de las rendijas e imposible de entender con el modelo de Newton (**Imagen 21**).

Además, utilizando el modelo ondulatorio Young determinó la longitud de onda de la luz, de una manera sencilla. Esta longitud resultó ser del orden de los 500 nanómetros, 0.5 milésimas de milímetro.

Nuestro recorrido termina en 1808, con el experimento de Malus. Etienne-Louise Malus se encontraba en su casa de París observando el palacio de Luxemburgo a través de un cristal de espato de Islandia y se dio cuenta de que en una de las posiciones del cristal la luz reflejada en los vidrios de las ventanas no producía el rayo extraordinario típico de la doble refracción.

Rápidamente intentó explicar el fenómeno comparando las dos teorías y llegó a la conclusión de que la luz reflejada en las ventanas estaba polarizada. Para entender este fenómeno debemos introducir el nuevo concepto de la polarización, que existe únicamente en el caso de ondas transversales.

Si volvemos al ejemplo de la onda transversal producida en una cuerda, podemos distinguir el caso en que la oscilación tiene lugar en un plano bien determinado. Cuando esto ocurre decimos que la onda está polarizada y el plano en el que ocurre esta vibración recibe el nombre de plano de polarización.

Las ondas de luz que nos iluminan no están polarizadas, por lo cual tenemos que admitir que la reflexión de la luz la polariza; Malus determinó que la luz reflejada se encuentra polarizada en el plano paralelo al vidrio (**Imagen 22**).

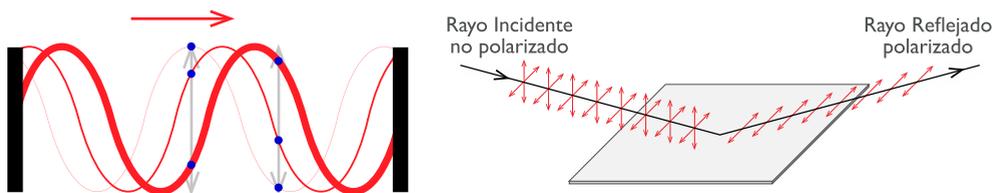


Imagen 22. Onda polarizada. La luz reflejada se comporta como una onda polarizada.

Y así llegó a la conclusión de que el espato divide al rayo incidente en dos rayos polarizados en planos perpendiculares, que corresponden a los rayos ordinario y extraordinario. Ambos rayos tienen diferentes velocidades de propagación y, por lo tanto, diferentes ángulos de refracción.

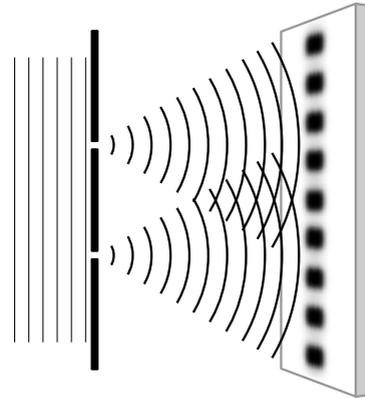


Imagen 21. Interferencia de ondas en el experimento de Young.

Como la luz reflejada en el vidrio de las ventanas del palacio estaban polarizadas previamente, en determinada posición sólo podía existir un rayo, lo que explicaba el fenómeno.

Pero las ondas transversales sólo se pueden conducir por un medio elástico, del que podemos inducir algunas propiedades a partir del conocimiento que tenemos de la propagación en este tipo de medios.

Una onda transversal en una cuerda se produce porque cuando separamos un trozo de su posición de equilibrio aparece una fuerza que tiende a restablecer la posición de reposo. Esta fuerza es de tipo elástico y su magnitud viene dada por el valor del módulo de Young. Cuanto mayor sea el valor de esa fuerza de recuperación mayor es la velocidad de propagación. Basándose en estos datos se llega a la conclusión de que el medio por el que se propaga la luz, al que los científicos de esa época llamaban *éter*, debía tener unas propiedades extraordinarias: tendría que ser un fluido sin viscosidad, transparente, no dispersivo, millones de veces más rígido que el acero pero sin masa. En resumen, una sustancia cuya existencia era difícil de admitir.

Así, si nos ponemos en el lugar de un estudiante de física de principios del siglo XIX, veremos que tendría que utilizar uno u otro modelo dependiendo del tipo de problema que le planteasen, pero seguía sin saber exactamente qué era realmente la luz.

En realidad esa pregunta nunca se ha resuelto y ni siquiera sabemos si debe plantearse dentro del contexto científico. La luz se comporta de una forma o de otra de acuerdo con las circunstancias del experimento. Más adelante vendrían Faraday y Maxwell que descubrirán la naturaleza electromagnética de la luz, sin resolver el enigma de su doble comportamiento.

Conclusiones

El esquema que hemos presentado de la historia de la óptica es, en realidad, una variación muy interesante del modelo de Kuhn de revolución científica, ya que no se produce ningún cambio de modelo como resultado de la crisis. La inconmensurabilidad de las dos teorías era tan pronunciada que resultó imposible sustituirlas por una nueva, por lo cual no se llegó a producir esa sustitución de modelos que es la esencia de las revoluciones científicas y ambas convivieron durante casi tres siglos.

Finalmente Einstein y de Broglie extendieron esta doble naturaleza de corpúsculo y onda a todas las partículas. Una vez comprobada experimentalmente la realidad del doble comportamiento, por medio de experimentos en los que se difractaban electrones, neutrones, protones e incluso átomos pequeños, se aceptó que todas las partículas podían presentar un comportamiento propio de corpúsculo o de onda, dependiendo de las circunstancias.

Esta unificación de los dos esquemas se ha convertido en la esencia del nuevo paradigma científico y la revolución científica de aceptar tan extraño comportamiento ha constituido la auténtica revolución científica de siglo XX, exportada de la óptica a toda la ciencia. Este año el premio Nobel de física se ha concedido por trabajos realizados en óptica cuántica, que es uno de los campos más interesantes de la ciencia. Pero esa es otra historia.

Referencias bibliográficas

MASON, F. STEPHEN. *A history of the Sciences*. Collier books. Toronto. 1962. 638 pp.

Grupo de extensión científica del IMAFF. *La medida del radio terrestre por Eratóstenes*. [En línea]: < <http://museovirtual.csic.es/descargas/archivos/eratostenes.pdf> >.

Grupo de extensión científica del IMAFF. *Sobre los tamaños y distancias del Sol y la Luna*. [En línea]: < <http://museovirtual.csic.es/descargas/archivos/dimension.pdf> >.

SANCHO LÓPEZ, JOSÉ M.ª; MORENO GÓMEZ, ESTEBAN; GÓMEZ DÍAZ, M.ª J. *La naturaleza de la luz*. [En línea]: < <http://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz23.htm> >.

SANCHO LÓPEZ, JOSÉ M.ª; MORENO GÓMEZ, ESTEBAN; GÓMEZ DÍAZ, M.ª J. *La medida de la velocidad de la luz*. [En línea]: < <http://museovirtual.csic.es/salas/luz/luz1.htm> >.

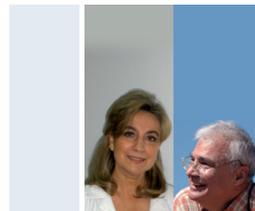
Wikimedia Commons: François Lemoyne. *Narciso*. < http://en.wikipedia.org/wiki/File:Fran%C3%A7ois_Lemoyne_001.jpg > .The Yorck Project.

Wikimedia Commons: Juan Van der Hammen. *Retrato de Francisco de Quevedo y Villegas, Madrid, Instituto Valencia de Don Juan*. < http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Retrato_de_Francisco_de_Quvedo.jpg > . PD-Art, PD-Old.

Wikimedia Commons: *Portrait of Johannes Kepler*. < <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:JKepler.png> > . PD-ART.

Wikimedia Commons: Jacob Coning. *Portrait of the Danish astronomer Ole Rømer*. < http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ole_Rømer.jpg > . Frederiksborg Museum.

El pensamiento divergente en el esquema de construcción de conocimiento de Piaget



M.ª J. Gómez Díaz* y José M.ª López Sancho

Coordinadora de El CSIC en la Escuela

Director de El CSIC en la Escuela

Palabras clave

Conocimiento, constructivismo, creatividad, lógica, ciencia, modelo.

Resumen

En este trabajo se presenta de una manera muy resumida el papel del pensamiento divergente en el proceso de creación de modelos, aplicándolo al caso de cambio de modelos científicos. Para ello se introducen previamente los conceptos necesarios para la exposición, se presenta con un cierto detalle, el proceso de acomodación de nuevos datos a la representación mental del mundo que va formando el alumno infantil y se identifica la parte creativa necesaria para que se produzca la solución de continuidad en el pensamiento.

Introducción

De acuerdo con Chomsky^[1] los seres humanos nacemos con algún tipo de software programado o, al menos, con la capacidad de que ese software se vaya autoprogramando al ir creciendo. Esta característica no es exclusiva del ser humano, ya que todos los animales nacen con los conocimientos suficientes para poder vivir; las aves, incluso cuando nazcan en una incubadora y no estén en contacto con otras aves, cuando llega el momento saben volar. Aunque Chomsky se refiere a la capacidad de formar una lengua, nosotros generalizamos su hipótesis y decimos que también nacemos con una segunda herramienta mental (del tipo de las herramientas vygotskianas^[2]) que no es otra que *la lógica*, a la que añadimos la de *creatividad*, menos estudiada y mucho menos predecible.

Podríamos decir que todos los animales nacen con una estructura lógica programada en el cerebro (o en la parte que juegue ese papel), pero en el caso de los seres humanos esa herramienta es mucho más poderosa y está programada para construir conocimiento.

.....
* E-mail de la autora: mjgomez@orgc.csic.es.

El ejemplo más sencillo del uso de la lógica es el que refiere Piaget cuando describe las reacciones circulares^[3] (que nosotros preferimos llamar razonamientos circulares), que vamos a exponer aquí en un caso muy simple. Supongamos que situamos una campanilla o cascabel cerca de un niño de meses. Si lo empuja en un movimiento sin objetivo, al azar, la campanilla sonará. Inmediatamente repetirá el movimiento de forma voluntaria hasta pasar a un estado en el que es consciente del comportamiento de la campanilla. Al cabo de unos cuantos sucesos de este tipo el niño asociará el sonido al movimiento de la campanilla.

Esta asociación la podemos escribir en forma de condición *si... entonces* (*if... then*).

- **Si se mueve** la campanilla, **entonces** suena.

Este conocimiento se puede entender como un *esquema* (en el sentido piagetiano) de una parte del mundo que él conoce, la campanilla; y la frase que hemos escrito se puede considerar como una ley de la naturaleza, ya que describe el comportamiento de una parte de ella, la campanilla.

Si meditamos sobre el proceso seguido desde la primera observación casual hasta la enunciación de la ley nos daremos cuenta de que se trata de un proceso de generalización, ya que la ley se ha establecido a partir de un pequeño número de experimentos (procesos realizados voluntariamente). Este proceso de inducción incompleta no es admisible en matemáticas pero, en cambio, es una de las piezas fundamentales del método científico, tal como lo enunció Francis Bacon^[4] en el siglo XVII. Es un proceso que implica un ingrediente nuevo: la creatividad.

Así, mediante la observación y la experimentación elemental, utilizando procesos creativos (no deducidos de la experiencia), el niño ha llegado a conocer una simplísima ley:

- **Si se mueve** la campanilla, **entonces** suena.
- **Si no se mueve** la campanilla, **entonces no** suena.

El paso siguiente consiste en decidir qué hacer si queremos que la campanilla suene. Esto equivale a deducir situaciones que llevan a que la campana suene, aplicando el conocimiento que ha obtenido sobre el comportamiento de la campanilla. Es lo que llamamos una competencia.

- **Si se mueve** la campanilla, **entonces** suena.
- **Si yo** quiero que suene la campanilla **entonces** la muevo.

El tercer paso es preguntarse qué ocurrirá si se mueven o golpean otros objetos. Unos sonarán (como otras campanillas similares, las campanas, los sonajeros, etc.) y otros responderán de formas diferentes, pero todas dignas de estudio y susceptibles de ser reducidas al modelo de construcción de conocimiento propuesto por Piaget.

Como resultado de las manipulaciones descritas y de su procesamiento el niño identifica primero un objeto, la campanilla, y luego una serie de objetos que se comportan igual. Como veremos más adelante a todos ellos los unifica y se refiere a ellos con un único nombre o sonido, en general onomatopéyico, y a todos los asignará un mismo comportamiento básico.

La utilidad de tener capacidad para llevar a cabo este tipo de razonamiento es evidente: el ser humano puede almacenar en su mente una especie de réplica imaginada de la realidad que lo rodea pudiendo así, mediante operaciones mentales, predecir lo que ocurrirá en el mundo real ante determinadas manipulaciones o diseñar sus propias acciones para producir determinadas respuestas en el mundo real. Todo esto es lo que describe Piaget en su modelo de esquema mental de los niños.

A continuación describiremos ese esquema, exponiendo previamente los conceptos que intervienen.

La forma en la que los seres humanos almacenan el conocimiento

Cuando se considera la forma en la que los seres humanos se plantean la resolución de problemas, encontramos dos tipos genéricos:

- La aplicación de recetas a las que se ha llegado por un procedimiento de ensayo y error, como la que utilizaban en la edad de los metales para la metalurgia del bronce o del hierro, o la fórmula de la pólvora negra traída de China, que se reproducía religiosamente o se modificaba para mejorarla por el procedimiento de prueba y error.
- La que se deduce a partir del conocimiento científico, basado en un modelo en el que se asigna una composición o fórmula a cada sustancia, deduciéndose de estas fórmula las transformaciones necesarias para obtener las características deseadas. En el caso de la pólvora, sabemos que uno de los componentes es el carbón, que produce CO_2 al quemarse, y otro es el nitrato potásico, que propor-

ciona el oxígeno necesario para la combustión. A partir de este conocimiento sabemos que se puede sustituir el nitrato por clorato potásico, por ejemplo, que realiza la misma función.

Es evidente que el conocimiento deseable es el que proviene de un modelo, por lo cual nuestro siguiente objetivo es el de estudiar cómo son estos modelos y cómo se construyen. Afortunadamente para ello contamos con el resultado de las investigaciones de Piaget, del que recordaremos los conceptos que introdujo, necesarios para entender su trabajo.

Conceptualizar es formar un concepto

Antes de introducir el modelo de Piaget de construcción de conocimiento debemos adquirir algunos conceptos imprescindibles. El primero de ellos es adquirir la idea de *concepto*.

El mundo se nos presenta con una cantidad de objetos cuyas características son imposibles de aprehender y almacenar en la mente. Por ello la evolución nos ha dotado de la capacidad de conceptualizar, capacidad sorprendente, fácilmente observable en los niños y que es imprescindible para la aparición del habla.

Básicamente el proceso de elaborar un concepto consiste en formar un conjunto (o clase) que contenga un número infinito de elementos y asignarle un nombre^[5]. Este proceso es el de clasificación de la realidad y cada una de las clases o conjuntos corresponde a un concepto. Los niños, por ejemplo, adquieren inmediatamente el concepto de *perro* a partir de la observación de unos pocos animales de esta especie y no dudan en identificar cualquier animal desconocido (real o imaginado, como los perros de los comics) como perteneciente (o no perteneciente) a ese conjunto. Si se asigna a ese conjunto un nombre común, en este caso el de *perro*, nos podremos referir a él al comunicarnos con otras personas. Y en ese conjunto iremos introduciendo animales concretos o imaginados, conocidos o desconocidos, sin límite de número; por eso decíamos que el concepto contiene un número infinito de elementos a los que podemos referirnos con una sola palabra (o gesto en los lenguajes de sordomudos).

Los niños van conceptualizando o clasificando el mundo desde que nacen hasta que dominan el idioma con una rapidez asombrosa, adquiriendo conceptos a veces imposibles de definir para un adulto. Ideas tan difíciles como la propiedad, la justi-

cia o el cariño son manejadas con facilidad desde edades muy tempranas sin que, sorprendentemente, nos cause asombro a los mayores que realicen un proceso tan complicado.

Borges^[6], en cambio, se dio cuenta de la potencia del proceso de conceptualización y la puso de manifiesto en su relato Funes el memorioso.

Pero la formación de conceptos no solo es importante para la comunicación utilizando un lenguaje. Su importancia reside de su papel en la facultad humana de pensar, ya que los elementos que intervienen en el pensamiento lógico son justamente esos conjuntos en los que hemos dividido el mundo.

A esa conclusión llegó Boole^[7], en 1854, representando las leyes del pensamiento humano por relaciones algebraicas (**Imagen 1**).

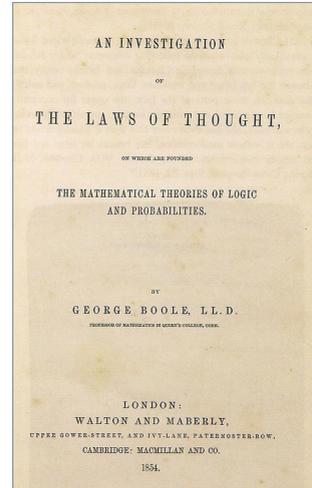


Imagen 1. Portada de «Las leyes del pensamiento» de G. Boole.

El enunciado de estas leyes y las operaciones que conllevan se simplifican enormemente si se emplea el método gráfico inventado por Venn y publicado en 1881 en su libro *Lógica Simbólica*, método que consiste en representar un concepto por medio de un círculo en el que se supone que se encuentran todos los elementos del conjunto.

La primera comprobación que puede hacerse de la potencia del método consiste en representar los silogismos de la lógica aristotélica utilizando los diagramas de Venn; además de divertido es interesante comprobar la relación entre los procesos del pensamiento humano y las relaciones de unión e intersección entre conjuntos (que representen conceptos). En la figura siguiente (**Imagen 2**) se representan el primer tipo de silogismo, bárbara, por medio de diagramas de Venn^[8].

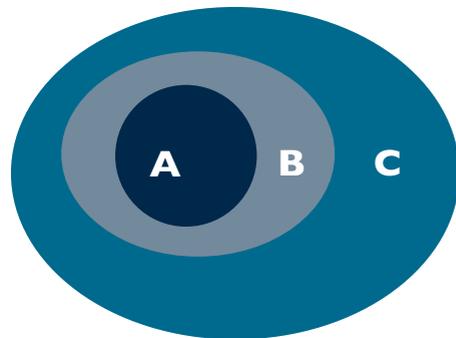


Imagen 2. Ejemplo de diagramas de Venn.

El siguiente concepto que vamos a utilizar es el de *esquema*, en el sentido que lo emplea Piaget. Para él un esquema es una representación mental del mundo que ha elaborado un ser humano. Esta representación va evolucionando y enriquecién-

dose con la edad y el estudio de este proceso es lo que constituye el desarrollo cognitivo de las personas.

El *esquema* de Piaget tiene que ser, necesariamente, una representación muy simplificada del mundo, ya que la información que podemos manejar en nuestra mente es, lógicamente, limitada. La primera simplificación del mundo que hemos estudiado es la que se realiza al representar por medio de un concepto los infinitos elementos que lo forman, de manera que los elementos constitutivos del *esquema* son los conceptos.

Lógicamente el número de conceptos va aumentando con la edad, la observación y el estudio (**Imagen 3**).



Imagen 3. Representación simplificada del mundo real.

La influencia de los conceptos que poseemos y la forma en la que entendemos el mundo

El proceso de elaboración de conceptos, aunque es una capacidad con la que nacemos (así lo establece Piaget en su psicología genética) está sometido a las influencias del entorno del niño y, además, tiene una influencia determinante en la forma en la que se entiende, clasifica y memoriza el mundo. Para exponer esta característica vamos a utilizar la llamada hipótesis fuerte de Sapir-Worf quien, hacia 1940, la define perfectamente.

De acuerdo con estos dos lingüistas, los conceptos que el niño domina, que se reflejan en el vocabulario que utiliza, son los elementos que traducen la realidad exterior, actuando como un filtro que sólo deja pasar los elementos que seamos capaces de entender con ayuda de los conceptos que hemos adquirido. Si, además, estos conceptos van unidos a juicios de valor podemos decir, como Worf, que el lenguaje que se maneja (conceptos que se poseen) determina el pensamiento de las personas, hipótesis que se conoce con el nombre de *determinismo lingüístico*.

Esta teoría nació como resultado de los trabajos de investigación de lingüistas y antropólogos americanos sobre las culturas autóctonas. Cuando intentaban traducir al inglés las leyendas, historias y conocimientos que estaban expresados en sus lenguas vernáculas, observaron que no había correspondencia directa entre las categorías y conceptos de ambas lenguas. El ejemplo mejor conocido, aunque apócrifo

fo, es el de las diez formas distintas de nieve que distinguen algunos esquimales, que ellos describen con otras tantas palabras, de imposible traducción a ninguna de las lenguas occidentales. Para Whorf esto implica que cuando una persona de habla inglesa contempla un paisaje nevado, no es capaz de *ver* más que los dos tipos de nieve que conoce, obteniendo una descripción de ese paisaje mucho más pobre y menos exacto que el obtenido por los esquimales.

Así, la elaboración del concepto de densidad por Arquímedes, permitió *entender* los fenómenos de flotación, cosa imposible si no se maneja este concepto. Por esa razón en la enseñanza siempre se prioriza la asignatura de lengua como una de las materias instrumentales más importantes.

El ejemplo más simple de esquema es el que hemos elaborado de nuestra ciudad, por ejemplo, que corresponde más o menos a un mapa mental. Allí están representados las calles con sus nombres, algunos edificios que conocemos y las características que hemos observado y que consideramos importantes, pero si oímos hablar de una parte de nuestra ciudad que no conocemos no seremos capaces de entender lo que dicen.

Segundo paso en la construcción del esquema: Relacionar las clases y asignarlas propiedades

A la vez que el niño va añadiendo conceptos a su representación del mundo, va asignando propiedades y características a estas clases. Así, la clase de los perros va asociada a la capacidad de ladrar y a la imposibilidad de hablar, la de los padres a *ser mayores*, la de los muñecos a no moverse o hacerlo mecánicamente, etc. Enseguida llegan a la conclusión, por ejemplo, de que las cosas nunca desaparecen y que se puede jugar a esconder un juguete para que ellos lo encuentren. Esta propiedad de la permanencia de los objetos es tan señalada que cuando se les pregunta a los niños, por ejemplo, qué ha ocurrido con el agua que mojaba la ropa antes de ponerla a secar nos contestan que se ha ido a sitios más o menos inverosímiles, pero nunca nos dicen que ha desaparecido.

Una vez establecidas las clases que distinguimos en la realidad, el segundo paso es representar en nuestro *esquema* las relaciones entre ellas, es decir, las acciones y reacciones que se producen cuando interaccionan entre sí.

Estas relaciones pueden ser muy sencillas, como las que corresponden a los procesos circulares de primer o segundo orden, los movimientos que experimentan los objetos cuando los lanzamos con más o menos fuerza, etc., o las más complicadas

como el provocar determinadas reacciones de los mayores por medio de acciones concretas del sujeto. Todas estas relaciones, que van adquiriendo estructura de leyes, perfeccionan poco a poco la exactitud de la representación mental del mundo en el que vivimos.

Es en ese esquema en el que realizamos las operaciones mentales que nos permiten resolver los problemas que plantean las acciones que emprendemos. El problema de las tres montañas^[9] es un ejemplo de la operatividad del esquema mental, ya que sólo puede resolverse dentro de la representación que hemos construido, tanto geométrica como de relaciones entre los elementos que la forman (**Imagen 4**).



Imagen 4. Problema de las tres montañas de Piaget.

Así pues, por medio de la observación del mundo, de nuestra experiencia y experimentos y de la información que recibimos formamos un esquema en el que representamos el mundo real de una manera extraordinariamente simplificada.

Adecuación del esquema de la mente al comportamiento del mundo real

Debe quedar claro que todo el conocimiento que poseemos del mundo exterior proviene exclusivamente del *esquema* que hemos construido de ese mundo y que almacenamos en nuestra mente. Nuestra capacidad de desenvolvernó en el mundo depende necesariamente de la exactitud con que el esquema refleje el mundo real.

El primer esquema del mundo real que el niño elabora se basa, como todos los demás que construirá después, en la observación de los objetos y en la experimentación que lleva a cabo sobre su comportamiento. Así, mediante manipulaciones directas de los objetos (manipulaciones que son verdaderos experimentos), a partir de los resultados de estos experimentos y mediante la aplicación de su lógica elemental, por medio de los razonamientos más elaborados que es capaz de realizar (en un principio razonamientos circulares), construye una representación de su entorno en el que los padres vienen cuando llora, los objetos caen cuando no están apoyados, las cosas no desaparecen nunca y, además, se mueven cuando se las empuja.

Este proceso de construcción del primer esquema o modelo científico (**Imagen 5**) es el primer proceso *vertical* que realiza. Es importante que nos demos cuenta de que llega a él por manipulación activa y de que todo el conocimiento que posee se condensa en ese modelo. Y lo más importante, la representación está formada por conceptos que se pueden dividir, como señaló Wittgenstein, en *cosas* (en las que se incluye su cuchara, sus juguetes, la manta o la almohada, es decir, nombres comunes) y en *hechos* (que se refieren a acciones como caer, sonar venir los padres, es decir, verbos).

A medida que va experimentando más con nuevos objetos somete los resultados de sus manipulaciones al modelo que ha elaborado. Durante mucho tiempo el comportamiento del mundo está de acuerdo con lo que su representación predice y este acuerdo supone un aumento de seguridad en la exactitud de su modelo. Cuando va comprobando que la gravedad actúa sobre cualquier objeto nuevo que se lance al espacio, que se produce

sonido cuando se golpea cualquier material sólido que esté a su alcance, aumenta su confianza en lo que sabe y en el modelo o representación que ha formado previamente. Este proceso es el que Piaget llama *asimilación*. Se puede definir como el proceso de afirmación del esquema basado en la confrontación del comportamiento del mundo real y lo esperado a partir de la representación y ambos, previsión y comportamiento, coinciden (**Imagen 6**).

No debemos creer que el niño tiene un solo modelo que refleje el comportamiento del mundo. En realidad en su mente va formando diversas representaciones en las que va incluyendo diferentes aspectos de la realidad, aunque todos ellos intervienen por medio de conceptos; por esa razón para modelizar una parte de la realidad es imprescindible haber conceptualizado previamente las *cosas* y las *acciones* (en el sentido de Wittgenstein) que intervienen en el esquema. Así, para elaborar el esquema de *fa-*



Imagen 5. Construcción del primer esquema mediante procesos verticales.



Imagen 6. Proceso de asimilación. Confrontación del modelo y el mundo real.

milia es necesario llegar al concepto de *padre*, al que el niño accede antes incluso de conocer la palabra genérica. Es habitual que oigamos a niños referirse a las familias como un grupo compuesto por un *papá*, una *mamá*, un *pedrito* y un *sultán*; la razón por la que hemos utilizado las minúsculas en *pedrito* y *sultán* es porque en este caso juegan el papel de nombres comunes, ya que designan a los conceptos hermano y perro que convive con la familia. Lo mismo ocurre con *un papá*, que el niño utiliza para referirse al concepto de *un padre*.

No debemos creer que el proceso cognitivo de conceptualizar le resulta difícil al niño. Debemos tener en cuenta que cada concepto corresponde a un nombre común o un verbo (caso de las *cosas* y de las *acciones*). En realidad es parte del conocimiento con que nace y al que se refiere el lingüista Chomski cuando dice que los seres humanos nacemos con la capacidad de construir lenguaje, de la misma manera que los pájaros nacen con el conocimiento necesario para volar. Es fácil darse cuenta de la validez de la suposición de Chomsky con solo ver cómo un niño inventa palabras, sobre todo regularizando verbos en tiempos que no haya oído antes. «Escribido», «ponido», etc., son ejemplos claros de esta capacidad.

En este punto debemos aclarar que aunque el modelo que propone Piaget (**Imagen 7**) es completamente aplicable a la construcción del conocimiento científico, el campo de aplicación de la ciencia se limita a una parte muy restringida de la realidad: a la de las magnitudes, *cosas*, en el sentido que da Wittgenstein a la palabra, **que se pueden medir, pesar o contar**. Y estas *cosas* requieren procesos de conceptualización diferentes de las demás: requieren un tratamiento experimental que incluya procesos de medida^[9].



Imagen 7. Modelo de construcción de conocimiento de Piaget.

Debemos tener en cuenta que el proceso de conceptualizar la fuerza no es inmediato. Se trata de incluir bajo un mismo nombre (y símbolo) un conjunto de entes que comprenden la acción de la gravedad sobre un objeto, la atracción o repul-

sión entre dos imanes, la atracción o repulsión de las cargas eléctricas, el efecto de un muelle comprimido o estirado, lo que ocurre cuando apretamos un objeto con la mano o lo que experimenta todo objeto sumergido en un fluido. Todos estos fenómenos tienen en común la intervención de una fuerza, que Leonardo representó, por primera vez en la historia, por un símbolo común: una flecha. Y para este proceso de identificación de cosas tan dispares en un mismo concepto es imprescindible seguir un **método estrictamente científico**, diferente de los procedimientos generales que se aplican en la enseñanza.

Por esa razón la enseñanza de la ciencia presenta características especiales en todos los niveles y especialmente en las primeras etapas. Así como en el caso de la enseñanza a adultos basta con que el profesor esté formado en contenidos y métodos, en el caso de las primeras etapas debe tener, además, un conocimiento detallado de las etapas cognitivas del niño en lo referente a capacidad de conceptualización de las nociones científicas que intervienen en las enseñanzas.

Otra dificultad con la que nos encontramos en el ámbito de la enseñanza de la ciencia es que las palabras con que nos referimos a los conceptos científicos son las mismas que se utilizan en el lenguaje corriente, pero con significados muy diferentes. Energía, presión, fuerza, peso, inercia, empuje, la información en genética, los puertos informáticos, etc., responden a conceptos muy bien definidos y diferentes a los que representan en el lenguaje coloquial.

Otra de las diferencias esenciales entre la ciencia y las demás disciplinas radica en el estricto constructivismo que se debe aplicar en la conceptualización y en la modelización, lo que obliga a realizar constantes mapas de Novak. Para que los niños se den cuenta de lo que es la energía deben conocer el concepto de trabajo, y para ello tienen que manejar operacionalmente el concepto de fuerza.

Como el desarrollo de modelos y teorías a lo largo de la historia de la ciencia es también constructivista, podemos seguir la historia como método de enseñanza, aprovechando el hecho para relacionar ciencia y desarrollo de la sociedad.

El tercer paso: La relación que existe entre las magnitudes

Los niños se dan cuenta muy pronto de la relación que existe entre las diversas magnitudes (cada una de las cuales corresponde a un concepto). Cuanto más grande es una botella de agua tanto mayor es su peso y la fuerza que tenemos que hacer para levantarla es mayor. Si nos movemos deprisa llegamos antes a los sitios

que están a la misma distancia y si nos movemos a la misma velocidad tardamos más en llegar a un sitio lejano que uno que se encuentre cerca. Esta relación que existe entre espacio o distancia y tiempo que tardamos, que hemos conceptualizado formando la magnitud *velocidad* (lo deprisa que me muevo), es un ejemplo de relación entre magnitudes.

Este mismo proceso tiene lugar en el mundo de la ciencia, pero presenta características especiales. Como las magnitudes se pueden medir, las relaciones entre ellas se pueden estudiar a partir de sus medidas, de esta forma, en ciencia, existen las definiciones y las leyes.

El descubrimiento de las leyes de la naturaleza y la creatividad

Para entender la naturaleza de la ciencia es esencial darse cuenta de que el proceso de descubrir una ley no es, ni mucho menos, automático, interviniendo en ese proceso una gran dosis de creatividad. Para aclarar este punto podemos utilizar el caso de la ley de Snell o de la refracción.

En principio, para descubrirla se necesita realizar experimentos cuantitativos con un montaje que nos permita medir el ángulo de incidencia, α , y el ángulo de refracción, β (**Imagen 8** y **tabla 1**).

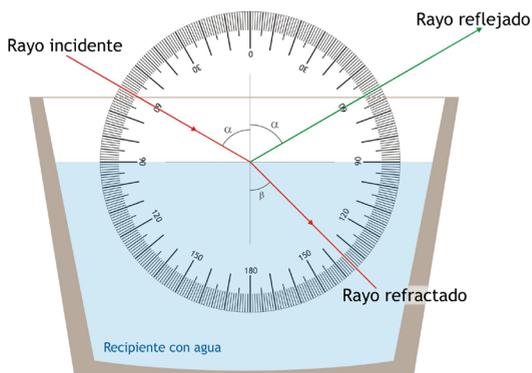


Imagen 8. Montaje para medir la refracción de la luz en el agua.

Ángulo de incidencia, en grados sexagesimales	Ángulo de refracción, en grados sexagesimales
0,00	0,00
5,00	3,76
10,0	7,50
15,0	11,2
20,0	14,9
25,0	18,5
30,0	22,1

Ángulo de incidencia, en grados sexagesimales	Ángulo de refracción, en grados sexagesimales
35,0	25,5
40,0	28,9
45,0	32,1
50,0	35,2
55,0	38,0
60,0	40,6
65,0	43,0
70,0	45,0
75,0	46,6
80,0	47,8
85,0	48,5

Tabla 1. Resultados de medir de la refracción de la luz en el agua.

En principio, el obtener la ley de la refracción consiste en descubrir la función matemática que reproduce los ángulos de refracción a partir de los ángulos de incidencia:

Ángulo de refracción = función (ángulo de incidencia)

Pero esta tarea no siempre es sencilla. Tenemos que tener en cuenta que los valores que obtiene el experimentador contienen errores experimentales, sistemáticos y aleatorios, que ocultan la verdadera relación entre las medidas de los dos ángulos. Además, el experimentador está sometido a sus propios preconceptos; esto es lo que le ocurrió a Claudio Ptolomeo, que vivió en Alejandría entre el 90 y el 168 d.C. y era un excelente científico, a pesar de lo cual y obcecado por la idea de que las leyes de la naturaleza eran sencillas, llegó a la conclusión de que el ángulo de incidencia era proporcional al ángulo de refracción; su ley, como puede comprobarse, solo es parcialmente cierta para ángulos pequeños, y la historia tuvo que esperar setecientos años hasta que el árabe Ibn Sahl la descubrió en Bagdad. Por ello, decimos que el descubrimiento de las leyes conlleva una gran dosis de creatividad, como todos los procesos de generalización.

El modelo como unidad de conocimiento

A veces nos hemos preguntado cómo podríamos hacernos una idea del conocimiento que poseían las personas de una cierta época histórica.

De acuerdo con lo que hemos expuesto, el conocimiento que tiene una persona sobre un determinado campo, por ejemplo sobre el cuerpo humano, puede evaluarse a partir de los modelos que maneja. Podrá describir el sistema digestivo de acuerdo con la

representación que haya construido a partir del conjunto de órganos que lo forman. Igualmente tendrá esquemas de los demás sistemas, tanto en lo que se refiere a la estructura o anatomía (que equivale a una foto fija) como a su funcionamiento o representación dinámica (fisiología). El conjunto de todos los modelos que un individuo ha construido contiene el conocimiento que posee.

En relación a este punto podemos citar la idea de *realidad* que tienen algunos filósofos empiristas, que la definen como el conjunto de todos los modelos posibles del mundo real. De acuerdo con esta forma de pensar la realidad para un griego es diferente de la realidad para un ciudadano de Florencia del siglo XVII y distinta de la realidad en la que nosotros nos movemos. Por ello, cuando enseñamos a una persona un modelo nuevo estamos aumentando el mundo en el que se puede mover, física e intelectualmente.

La crisis como desencadenante de la creatividad

En el proceso descrito de descubrir nuevos fenómenos e intentar explicarlos con los modelos conocidos (asimilación), llega un momento en el que nos encontramos con un proceso nuevo, imposible de explicar con los conocimientos que poseemos. Es el caso de la desaparición del agua de la ropa mojada o de la aparición de un campo magnético sin la presencia de imán. En este caso, de acuerdo con Kuhn^[10] y Piaget^[11], se produce en la mente de las personas una situación de crisis (**Imagen 9**).

Tras un periodo en el que se duda de la realidad del nuevo fenómeno o se intenta forzar el modelo antiguo para que explique de alguna manera el proceso nuevo, se llega a la conclusión de que es una tarea inútil. El modelo ya no nos sirve.

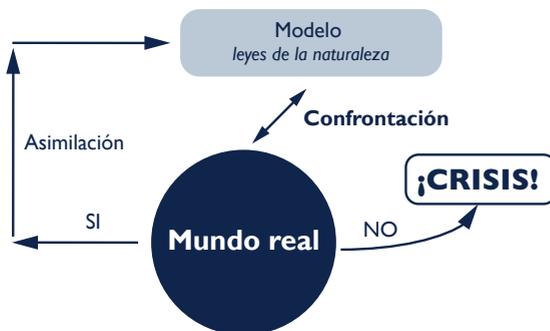


Imagen 9. Nuevo proceso: situación de crisis.

Los modelos, mundos sutiles

Ante esta situación tanto el niño como el científico se ve obligado a inventar un modelo nuevo. Pero esto no es fácil ya que este nuevo modelo tiene que explicar no sólo los fenómenos inexplicables por el viejo sino todo el conjunto de los procesos

que constituían la *ciencia vieja* y que se entendían perfectamente hasta que sobrevino la crisis (**Imagen 10**). Así tenemos que admitir que el agua está formada por moléculas invisibles para el ojo desnudo y que los campos magnéticos son producidos por cualquier carga en movimiento, en contra de lo que hasta entonces habíamos pensado.



Imagen 10. El nuevo modelo debemos encontrarlo fuera de la caja.

Debemos dejar claro que este proceso *horizontal, transversal o divergente, que tiene lugar fuera de la caja*, corresponde a la *creación* de un modelo nuevo, distinto y, a veces, contradictorio con el esquema establecido: **es un proceso creativo**^[12].

Tradicionalmente se suele contar una historia para ilustrar el pensamiento divergente. Cuenta que había un molinero que trabajaba en un molino arrendado, cuya hija era de excepcional belleza. En años de sequía el molinero dejó a deber el dinero de la renta, pero como el tiempo pasaba y seguía sin llover el dueño del molino, hombre mayor y muy poco atractivo, le reclamó la deuda, a lo que el molinero contestó que no tenía modo de pagarle lo que le debía. El dueño del molino, viendo que no podía recuperar el dinero aunque el molinero fuese a la cárcel, le propuso un trato; pondrían en un saquito una piedra blanca y una negra, de las que cubrían la playa y su hija sacaría una de ellas, sin mirar. Si sacaba la piedra blanca la deuda quedaría perdonada, pero si sacaba la piedra negra la chica debería casarse con el dueño del molino sin rechistar. Tan desesperada era la situación que el molinero y su hija accedieron con mucha pesadumbre.

El día elegido para llevar a cabo el proceso, se reunieron en la playa el molinero y su hija, el juez que debía presidir el acto y todo el pueblo, que conocía y apreciaba al molinero y a su hija. El dueño se agachó, eligió una piedra blanca y una piedra negra de la playa e hizo ademán de introducir las en el saquito, pero la chica se dio cuenta de que en realidad había metido dos piedras negras que llevaba preparadas

en la manga. Rápidamente pensó en denunciar al dueño por tramposo, pero este podría decir que se había equivocado y repetir el proceso, con lo cual tendría un cincuenta por ciento de posibilidades de perder. La chica no dijo nada y siguió adelante con el proceso. Metió la mano sin mirar y sacó una piedra con el puño cerrado. Pero cuando iba a enseñárselo al juez tropezó y cayó al suelo, con lo que abrió la mano y la piedra cayó junto a los miles de piedras blancas y negras que formaban la playa. La chica se levantó rápidamente y dijo a todos los reunidos: no nos debemos preocupar; si miramos la piedra que todavía permanece en el saquito podemos saber con certeza el color de la piedra que el destino me ha hecho sacar. Así lo hicieron y todos pudieron comprobar que la piedra que quedaba era negra, con lo cual no había duda de que la que ella había sacado era blanca. No hace falta ningún tipo de discusión para ver la razón por la que esta clase de razonamiento, en la que se utilizan elementos diferentes de los que intervienen en el planteamiento del problema, se dice que tiene lugar *fuera de la caja*.

Volviendo al hilo de nuestra presentación podemos decir que la aceptación de un modelo nuevo suele ser un proceso nada fácil, incluso para su autor, y existen buenos ejemplos de ello. Los guiones de cine y las novelas de misterio contienen ejemplos en los que el protagonista tiene que modificar el modelo que tiene de una de las personas allegadas, al ir percibiendo pruebas de que le está traicionando. Estas pruebas suelen ser malinterpretadas voluntariamente por el que las percibe y sólo tras una lucha interna terminará aceptando el nuevo modelo del personaje, el de traidor.

La misma reacción ocurre ante un cambio de modelo en el mundo científico y tenemos muchos ejemplos de ello. Cuando Copérnico concibió el universo heliocéntrico no lo consideró una representación de la realidad sino una especie de truco matemático que le permitía predecir los movimientos de los planetas de manera más sencilla. Tan implantado estaba el modelo de Ptolomeo en la sociedad y en las mentes de las personas. Por eso fue tan importante la aportación de Galileo, al atreverse a defender la realidad del modelo de Copérnico (publicado en 1543), contrario al paradigma de la época. La labor de Galileo comenzó en 1610, con la publicación de un trabajo sobre las manchas solares y culminó con sus *Diálogo de los dos Máximos Sistemas de Mundo*, publicados en 1632, en los que defendía abiertamente la realidad física del mundo heliocéntrico. La reacción de la sociedad fue la que todos conocemos, una reacción ante la inercia que presentan tanto las mentes de los individuos como la del intelecto colectivo.

Lo mismo le ocurrió 1963 a Murray Gell-Mann cuando publicó su modelo de quarks, también lo consideró una hipótesis útil para clasificar los hadrones, pero nada más. Igual que con el universo de Copérnico, poco después se comprobó que era cierto al ser identificados en el laboratorio.

El proceso de acomodación de Piaget

El proceso divergente que hemos descrito es la base del mecanismo de cambio de modelo en el esquema de Piaget, mecanismo que él llama *acomodación*, por razones obvias. Este proceso es general en la vida del niño (y del científico). Así, de muy pequeño *crea* o explica la aparición de regalos debajo del árbol de navidad o en el zapato que deja el día 5 de enero en la ventana por la intervención de Papá Noel o de los Reyes Magos, pero cuando obser-

va contradicciones en su modelo o descubre alguna inconsistencia, se ve obligado a explicar los nuevos hechos fuera del modelo mágico anterior, en un auténtico proceso de acomodación piagetiana. Lo mismo ocurrió cuando Galileo observó que la Luna tenía montañas y valles como nuestra Tierra, en vez de ser perfectamente esférica como postulaba Aristóteles y aseguraban los escolásticos. No había más remedio que acomodar los modelos a los nuevos descubrimientos, para lo cual hubo que crear una nueva ciencia (**Imagen 11**).



Imagen 11. Nuevo modelo: acomodación.

Y en este punto aparece una situación nueva: nos encontramos con dos modelos diferentes de realidad: la del universo geocéntrico y la del heliocéntrico, o la del mundo mágico de los reyes magos y la real con la intervención de los padres. En contra de lo que dicta el sentido común, en ciencia se adopta una actitud simplificadora: en una situación concreta adoptaremos entre todos los modelos de que dispongamos, el modelo más sencillo entre los que proporcionen una respuesta correcta dentro de la precisión que requiera el problema. Así, para situar una estrella en el firmamento utilizaremos un sistema de coordenadas con centro en la Tierra, igual que para todas las operaciones de vuelos de aviones y navegación de barcos, aunque sabemos que nuestro planeta no está fijo en el espacio.

En enseñanza, a veces es conveniente enseñar un modelo obsoleto, como el del imán situado en el eje de la Tierra para explicar la existencia del campo magnético terrestre, aunque después tengamos que sustituirlo por otro más avanzado (**Imagen 12**).

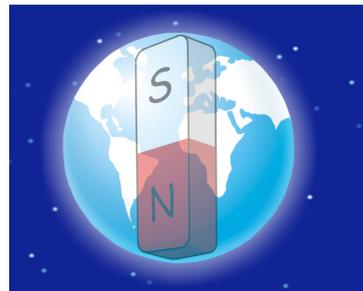
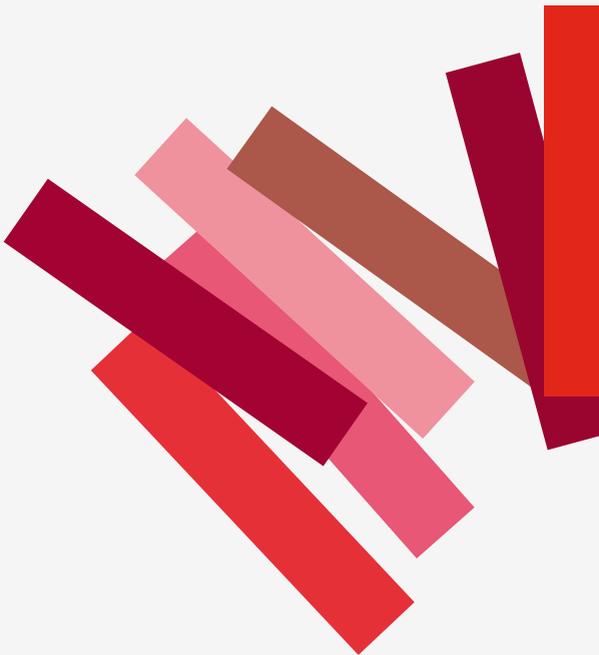


Imagen 12. Modelo de magnetismo terrestre: imán situado en el eje terrestre.

El recorrer la historia de la ciencia nos da la oportunidad de enseñar al niño la belleza de los procesos de sustitución de un modelo por otro, a la vez que la conveniencia de utilizar representaciones aproximadas y obsoletas cuando no se requiere mayor precisión o comprensión más profunda del fenómeno.

Referencias bibliográficas

- [1] CHOMSKY, N. *Aspects of the Theory of Syntax*. MIT Press, 1965. 251 pp.
- [2] VYGOTSKY, L. *El desarrollo de los procesos psicológicos superiores*. Barcelona: Crítica. 1979.
- [3] Wikipedia. Jean Piaget. [En línea]: <http://es.wikipedia.org/wiki/Jean_Piaget> [Consulta octubre 2012].
- [4] FRANCIS BACON. *Novun Organum*. Buenos Aires: Losada. 2004. 354 pp.
- [5] REFOLIO REFOLIO, M.^a. C.; GÓMEZ DÍAZ, M.^a. J.; LÓPEZ ÁLVAREZ J. M. & LÓPEZ SANCHO, J. M.^a. «La naturaleza del conocimiento: los modelos en la enseñanza de la ciencia». *Serie El CSIC en la Escuela*. N.º 2. CSIC 2011. 76 pp.
- [6] BORGES, JORGE LUIS. *Ficciones*. Textos en línea. [En línea]: <<http://www.textosenlinea.com.ar/borges/Ficciones.pdf>> [Consulta: septiembre 2010].
- [7] BOOLE, G. *Una investigación sobre las leyes del pensamiento*. Thomson Paraninfo, 1982.
- [8] FISILOGOI. *Teoría del conocimiento*. Revisado por Miguel de Córdoba. [En línea]: <<http://fisiologi.com/paginas/historia/inductivodeductivo.htm>> [Consulta octubre 2012].
- [9] PIAGET, J. *Problema de las tres montañas*. Publicado originalmente en 1947, se puede estudiar en: Aebli, H. *Factores de la Enseñanza Que Favorecen el Aprendizaje Autónomo*. Madrid: Narcea. 2001. 363 pp.
- [10] KUHN, T. S. *La estructura de las revoluciones científicas*. México: Fondo de cultura Económica, 2005. 361 pp.
- [11] DOROTHY. G. S. & TRACEY. A. *A Piaget Primer: How a Child Thinks*. New York: Penguin Books. 1978. 160 pp.
- [12] OAKLEY, L. *Cognitive Development (Routledge Modular Psychology)*. Taylor & Francis digital edition. 2007. 176 pp.



e-ISBN: 978-84-00-09659-5



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



CSIC

Fundación **BBVA**