

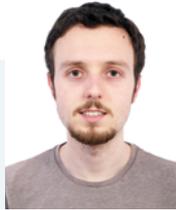
# Notas de clase

Una pizarra en la que intercambiar experiencias docentes

## Iridiscencia y cristales fotónicos en el Bachillerato

**Manuel Alonso Orts**

Institute of Solid State Physics, University of Bremen,  
28359, Bremen (Alemania)



**Manuel Alonso Sánchez**

Sección Local de Alicante de la RSEF



Se presenta una propuesta didáctica para introducir al alumnado de Bachillerato o de primeros cursos de universidad en el estudio de los cristales fotónicos. Este tema conecta con conceptos básicos de física y de biología, y puede resultar altamente motivador por su presencia y utilidad en el mundo natural, así como por su contribución al desarrollo científico-tecnológico. La propuesta se concreta mediante una secuencia de enseñanza-aprendizaje; comienza reforzando nociones relacionadas con el color que forman parte de la enseñanza habitual en Bachillerato, prosigue estudiando la iridiscencia a partir de la interferencia, y culmina ampliando dichos conceptos para adentrarse en el fascinante mundo de los cristales fotónicos.

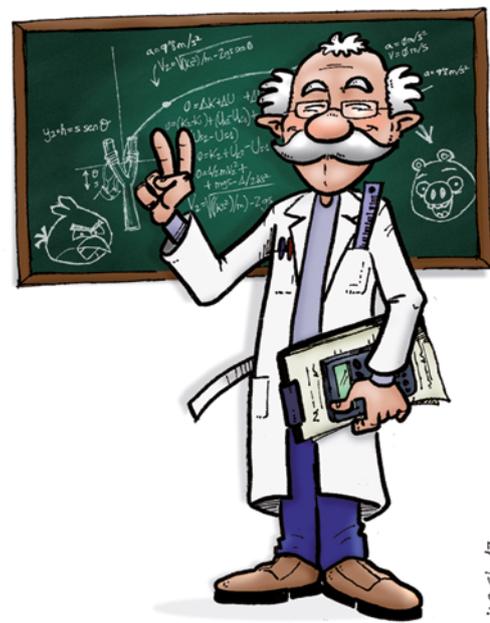
### Introducción

El currículum de Física de Bachillerato incluye unas nociones básicas sobre el color, pero de ellas se excluye a la *coloración estructural*; la producción de color por superficies con estructuras microscópicas suficientemente finas para interferir con la luz visible, a pesar de que este fenómeno óptico es un ejemplo de aplicación elemental de las interferencias.

Por otra parte, un estudio de la iridiscencia es muy atractivo por su presencia tanto en el medio natural como en aplicaciones del día a día, además de poder hacer de puente para conectar con investigaciones y aplicaciones actuales en el campo de la fotónica, en particular con los *cristales fotónicos*.

En este trabajo nos proponemos mostrar que es posible llegar a sumergir al alumnado preuniversitario en el interesante mundo de los mencionados cristales fotónicos, consiguiendo que se entienda la física básica que los fundamenta, se conozcan algunas de sus manifestaciones en el medio natural y se tome conciencia de su interés y utilidad en el desarrollo científico-tecnológico.

Para ello hemos elaborado una secuencia de enseñanza-aprendizaje que comienza desarrollando y ampliando los conceptos que, sobre el color, forman parte de la enseñanza



16-1-13

Ilustración por gentileza de Alberto García Gómez (albertogg.com).

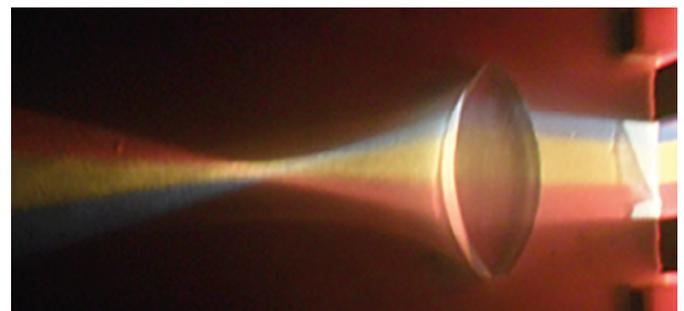
habitual en esta etapa, prosigue estudiando la iridiscencia a partir de la interferencia, y termina adentrándose en el estudio de los cristales fotónicos.

La secuencia también puede ser implementada en primeros cursos de Universidad, donde no cabe duda de que ha de resultar muy atractivo un desarrollo específico de estos contenidos.

### 1. Luces primarias

Las primeras nociones que adquiere el alumnado de Bachillerato sobre el color se presentan cuando los estudiantes analizan el proceso de dispersión de la luz blanca, por ejemplo, usando un prisma. Saben que la luz blanca es una combinación de campos electromagnéticos cuyas longitudes de onda abarcan desde el violeta (380 nm) hasta el rojo (750 nm) y entienden que la causa de que esa dispersión se produzca es que el índice de refracción en el vidrio disminuye ligeramente cuando aumenta la longitud de onda: las longitudes de onda más largas (rojo) se desvían menos que las cortas (violeta).

A partir de aquí les informamos de que en el siglo XIX se desarrolló la teoría tricromática del color (basada en los trabajos de Young y Von Helmholtz), según la cual cualquier color-luz se puede obtener combinando en distintas proporciones tres luces primarias del espectro solar, que se corresponden con los colores rojo, verde y azul. Como sabemos, los televisores y los monitores de ordenador utilizan estas tres luces para producir toda la gama cromática que podemos ver en sus pantallas y, en clase, podemos ilustrar su fun-



**Figura 1.** Suma de tres luces con una lente convergente. Si los espectros de las tres luces completan la gama de longitudes de onda de la luz visible, la resultante tiende al blanco. Fotografía tomada por estudiantes de Bachillerato en el laboratorio del IES Leonardo da Vinci de Alicante.

cionamiento con cañones de luz de intensidad regulable de estas tres longitudes de onda. Otra experiencia para realizar consiste en utilizar una lente convergente para sumar en el foco tres luces previamente obtenidas haciendo pasar luz blanca por un triple filtro. (Fig. 1)

## 2. Color-pigmento

Cuando el alumnado se ha apropiado de los conceptos vistos en el apartado anterior, les preguntamos qué creen que determina el color del mundo natural que nos rodea. Por ejemplo, ¿por qué nuestro color de piel puede ser más claro u oscuro, la mayoría de las hojas de las plantas son verdes o los tomates son rojos y las zanahorias naranjas?

Los estudiantes saben que la mayoría de los objetos que vemos no emiten luz propia y que percibimos “su color”, cuando son iluminados. Por tanto, concluyen que cuando la luz (blanca) incide en la superficie de los objetos, parte de ella es absorbida y el resto reflejada, siendo esto último lo que recoge nuestra retina y el cerebro interpreta como un color.

Este es el primer paso para responder a la cuestión, pero, se ha de aclarar que no responde al “qué” sino al “cómo”. Para los ejemplos anteriores, el “qué” es la presencia de ciertos compuestos químicos. Por ejemplo, es de conocimiento popular que la melanina absorbe gran parte de la radiación ultravioleta que proviene del Sol y protege a nuestro cuerpo del cáncer de piel. La forma más común de la melanina en nuestra piel es la denominada eumelanina, una serie de polímeros cuya máxima absorción se encuentra en longitudes de onda menores de 400 nm (rango UV), pero que también tienen cierta absorción en el azul-verde. Como resultado, la eumelanina tiene un color marrón oscuro, y a mayor cantidad de eumelanina en nuestra piel, más oscura será para nuestros ojos y mayor grado de protección tendrá frente a la radiación UV del Sol.

Un compuesto, como la eumelanina, que absorbe selectivamente ciertas longitudes de onda, se denomina *pigmento*. Para el resto de los ejemplos planteados anteriormente al alumnado, también son pigmentos los que determinan su color. Así, la superficie de las hojas contiene dos tipos de clorofila. Ambos son muy similares químicamente, pues están basados en un anillo tetrapirrólico con un ion de magnesio en el centro, y ambos absorben luz muy eficientemente tanto en el violeta-azul (400-500 nm) como en el naranja-rojo (600-700 nm), reflejando por tanto luz verde (Fig. 2).

Por su parte, los tomates y las zanahorias tienen como pigmento dominante el licopeno y el  $\beta$ -caroteno, ambos con fórmula química  $C_{40}H_{56}$  pero con distinta disposición de enlaces [1]. El licopeno absorbe luz hasta longitudes de onda cercanas a los 600 nm, mientras que el caroteno absorbe hasta ligeramente menor longitud de onda (Fig. 2). Por eso vemos los tomates de color rojo y las zanahorias de color naranja. De estos ejemplos también se aprende que, para conocer las propiedades de absorción de un compuesto, no solo hay que fijarse en su composición química, sino también en su estructura de enlaces.

Terminamos este apartado mencionando al alumnado la cantidad de pigmentos utilizados por el ser humano y su papel en el desarrollo de la humanidad; desde los óxidos de hierro presentes en las pinturas rupestres hasta los pigmentos sintéticos que tiñen, por ejemplo, nuestros tejidos textiles.

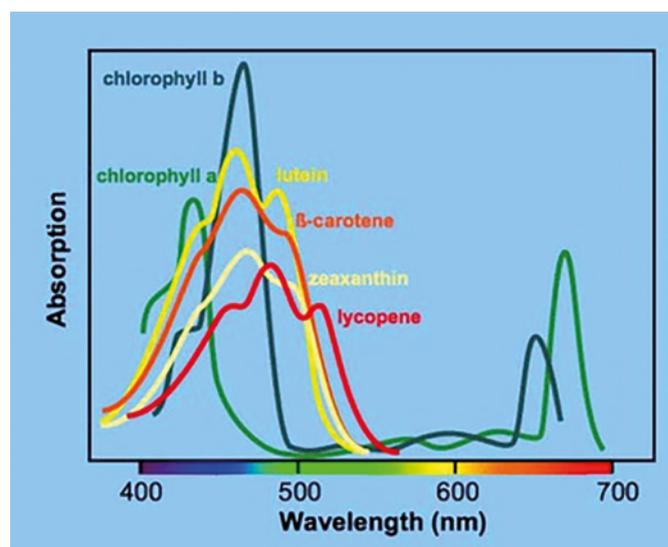


Fig. 2. Espectros de absorción de varios tipos de pigmentos presentes en las plantas [1]. Obsérvese la clorofila a y b (verde), el  $\beta$ -caroteno (naranja) y el licopeno (rojo), mencionados en el texto.

## 3. Iridiscencia

Comienza aquí la segunda parte de la secuencia de aprendizaje, donde los estudiantes podrán aprender qué es la iridiscencia y que les mostramos en una de sus manifestaciones cotidianas: la que se produce cuando se derrama aceite usado de motor sobre asfalto húmedo o cuando se deja una sartén “mal fregada” y queda en ella aceite utilizado previamente. Al mirar oblicuamente a ese suelo asfaltado o a esa sartén, se observan mosaicos de colores (Fig. 3).



Fig. 3. Iridiscencia producida por una capa de aceite derramado en un suelo asfaltado y húmedo (Wikipedia).

Cuando preguntamos a los estudiantes cómo se pueden estar produciendo esos colores, se dan cuenta inmediatamente de que no tienen un origen químico, ya que no hay ninguna razón para pensar que el aceite haya podido experimentar dicho cambio por el simple hecho de derramarse sobre el agua (el aceite y el agua son inmiscibles). Entonces les informamos de que se trata de un ejemplo de los llamados *colores*

estructurales, que se producen mediante interferencias. Y les pedimos que realicen un diagrama de rayos elemental del proceso para buscar esas interferencias (Fig. 4).

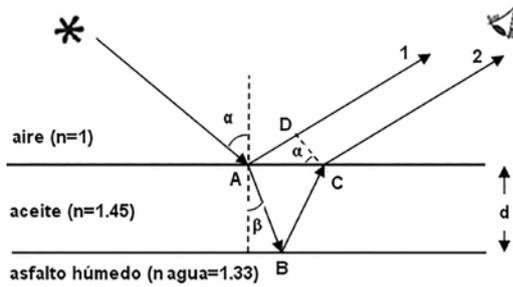


Fig. 4. Diagrama para explicar la iridiscencia en una capa de aceite sobre un asfalto húmedo.

El diagrama enseña que los colores iridiscentes se deben a la interferencia entre los rayos 1 y 2, la cual puede ser constructiva (I.C.) o destructiva (I.D.), y ello depende de los índices de refracción de los medios involucrados, del ángulo de incidencia, del espesor de la lámina y de la frecuencia de la luz. Para un determinado valor del resto de variables, se producirá I.C. en torno a una cierta frecuencia de la luz, reforzando el color correspondiente respecto al resto.

Conviene realizar un desarrollo elemental y obtener una expresión literal de la diferencia de caminos ópticos entre los dos rayos 1 y 2,  $\Delta r_{12}$ . Dicho desarrollo puede ayudar al alumnado de cara a sus estudios posteriores, ya que quienes continúen interesados en la Física tendrán que considerar en no pocas ocasiones desfases entre ondas; por ejemplo, en óptica, en cuántica, en estado sólido, etc.

En este caso la diferencia de caminos ópticos que se busca depende de: a) el cambio o no de fase que se pueda producir en las reflexiones; b) la diferencia de recorrido de la luz.

a) La componente del campo eléctrico perpendicular al plano de incidencia se invierte en todo proceso de reflexión de la luz cuando el índice de refracción del medio incidente,  $n_1$ , es menor que el del medio sobre el que se refleja la onda,  $n_2$  (Fig. 5). Esto ocurre en la reflexión que da lugar al rayo 1 y trae un desfase en la vibración del campo de  $\phi_a = \pi$ , análogo a una diferencia de camino de  $\lambda/2$ .

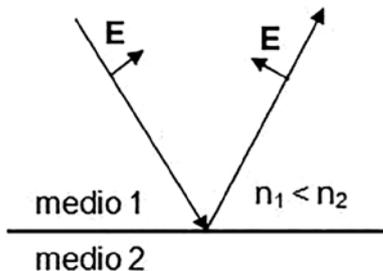


Fig. 5. Inversión del campo eléctrico en la reflexión ( $n_1 < n_2$ ).

b) La diferencia de camino óptico entre los rayos, 1 y 2, debida a la diferencia recorrido de la luz es:

$$\Delta r = n_{aceite} (AB + BC) - n_{aire} (AD) \quad (1)$$

De la figura se deducen directamente las siguientes relaciones:

$$AB = BC = \frac{d}{\cos \beta} \quad (2a)$$

$$AD = AC \cdot \sin \alpha \quad (2b)$$

$$AC/2 = d \cdot \tan \beta \quad (2c)$$

Al sustituir las expresiones anteriores en (1), teniendo en cuenta que  $n_{aire} = 1$  y llamando simplemente  $n$  al índice de refracción del aceite, obtenemos:

$$\Delta r = \frac{2 \cdot n \cdot d}{\cos \beta} - 2 \cdot d \cdot \sin \alpha \tan \beta \quad (3)$$

Los ángulos de incidencia,  $\alpha$ , y de refracción en el aceite,  $\beta$ , se relacionan mediante la ley de Snell:

$$1 \cdot \sin \alpha = n \cdot \sin \beta \quad (4)$$

Sustituyendo (4) en (3) y teniendo en cuenta que  $(\sin \beta)^2 + (\cos \beta)^2 = 1$  queda:

$$\Delta r = 2 \cdot n \cdot d \cdot \cos \beta \quad (5)$$

Finalmente, considerando los dos aspectos (a y b), la diferencia de camino óptico entre los rayos 1 y 2 resulta:

$$\Delta r_{12} = 2 \cdot n \cdot d \cdot \cos \beta - \lambda/2 \quad (6)$$

La condición de I.C. se cumple cuando esta diferencia de camino óptico es un múltiplo par de la longitud de onda y la condición de I.D. se tiene cuando  $\Delta r_{12}$  es un múltiplo impar de ella. Por tanto:

$$\text{I.C: } \Delta r_{12} = 2m\lambda_{I.C} \rightarrow \lambda_{I.C} = \frac{4dncos\beta}{(2m + 1)} \quad (7a)$$

$$\text{I.D: } \Delta r_{12} = (2m + 1) \lambda_{I.D} \rightarrow \lambda_{I.D} = \frac{2dncos\beta}{(m + 1)} \quad (7b)$$

En ambas expresiones,  $m = 0, 1, 2, \dots$

Conviene analizar las expresiones (7a) y (7b), extrayendo algunas consecuencias.

Una primera cuestión por analizar, muy importante, es el hecho de que para que se observe la iridiscencia, el espesor,  $d$ , ha de ser del mismo orden de magnitud del rango de valores de la longitud de onda,  $\lambda$ , de la luz que puede interferir. En clase podemos comprobar, por ejemplo, que en una lámina de aceite ( $n = 1.45$ ), cuyo espesor sea algo menor que las longitudes de onda de la luz visible (300 nm), se tiene, para una incidencia de la luz casi vertical ( $\cos \beta \approx 1$ ), un único máximo dentro del espectro visible correspondiente a una longitud de onda de 580 nm, lo que visualmente implica un color verde-amarillento. En cambio, en otra lámina del mismo aceite, a la que podamos considerar gruesa en comparación con el rango de longitudes de onda del espectro visible (1200 nm), se obtienen 4 máximos entre el naranja y el violeta, cuya superposición da lugar a una luz blanca-grisácea.

La segunda cuestión para analizar es el hecho de que los colores que podemos ver reforzados cambian si lo hace el punto de observación. Podemos estudiar la observación desde, por ejemplo,  $\alpha = 45^\circ$ . Utilizando la ley de Snell se obtiene  $\beta = 29^\circ$ , y aplicando (7a) se obtiene  $\lambda_{I.C} = 506$  nm, correspon-

diente a un color verde-azulado, que contrasta con el color verde-amarillento obtenido en incidencia normal.

Finalmente, otro factor que interesa analizar es la intervención de los índices de refracción. Si, por ejemplo, se sustituyera el agua del asfalto húmedo por otro medio de índice de refracción mayor que el del aceite usado, el rayo 2, al reflejarse ahí también experimentaría un desfase igual a  $\pi$ . Entonces habría un intercambio de papeles de las condiciones de I.C e I.D, (7a) y (7b), y se verían reforzados colores complementarios a los tratados en estos ejemplos.

Por supuesto, el fenómeno real es más complejo que la situación simplificada que acabamos de analizar en estos desarrollos adecuados al nivel de Bachillerato. Algunos posibles factores no tenidos en cuenta en el modelo son que las capas de aceite no son estrictamente plano-paralelas, sino que suelen tener un espesor variable, o que, aunque el aceite es inmisible en el agua, se pueden formar pequeñas burbujas de ésta en su interior, etc. Estos factores influyen en el mosaico de colores, pero no afectan esencialmente al proceso estudiado.

Los conocimientos usados en el desarrollo anterior son, con ligeras modificaciones, aplicables a otros fenómenos cotidianos de iridiscencia que se pueden observar y explicar en el aula, como, entre otros, los siguientes:

- Pompas de jabón. Se pueden fabricar, iluminar y observar en clase. Podemos montar un bonito espectáculo visual iluminando a una pompa desde diferentes ángulos o haciéndola viajar por el aire, donde sufre expansiones y compresiones, rota sobre sí misma, etc. Los ángulos de incidencia de la luz sobre ella cambian continuamente, y, con ellos, lo hace el mosaico de colores iridiscente.
- Polvos de talco en un espejo [2]. En este caso, la interferencia que da lugar a los colores iridiscentes se produce entre dos rayos que se reflejan en un mismo grano del talco (Fig. 6).

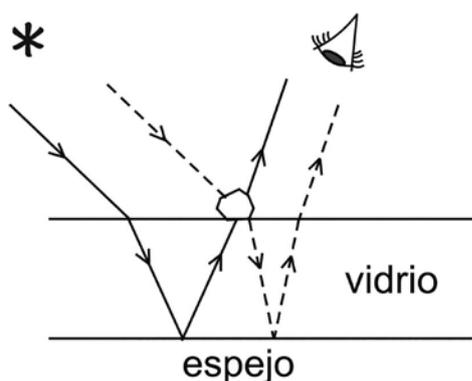


Fig. 6. Diagrama para explicar la iridiscencia en un “espejo sucio” [2].

- Esmalte de uñas en una cartulina negra. Podemos producir una iridiscencia imprimible dejando caer una gotita de laca en un recipiente con agua. Después de sumergirse, la gotita sube a la superficie, donde el agua la estira formando una capa flotante ancha, muy fina e iridiscente. Sacamos del agua una cartulina negra previamente sumergida y queda impresa en ella el mosaico de colores [3].

Terminamos este apartado señalando que los fenómenos de interferencia producidos por capas delgadas tienen, más allá de su gran belleza e interés físico, aplicaciones importantes.

Una que nos ayudará a introducir los cristales fotónicos, son los *recubrimientos de lámina delgada de cuarto de onda*. Como su nombre indica, el espesor de estos recubrimientos es igual a  $\lambda/4n$  y, debido a que su índice de refracción suele ser inferior al del material que recubre, se suele tener  $\phi_1 = 0$ , dando lugar, como ya sabemos, al intercambio de papeles de las condiciones de interferencia, con lo que la luz reflejada cumple la condición de I.D. en lugar de I.C en incidencia normal. La imagen adjunta (Fig. 7) muestra una lámina de óxido de aluminio con  $n = 1.64$  y  $d = 107$  nm sobre silicio, fabricada por el primer autor de este artículo como antirreflejante en el rojo ( $\lambda = 4 \cdot 1.64 \cdot 107$  nm = 700 nm) que efectivamente muestra una reflectividad mínima, únicamente de un 3%, en 700 nm. Este tipo de recubrimientos se usan habitualmente, por ejemplo en gafas de cristal antirreflejante y en células solares.

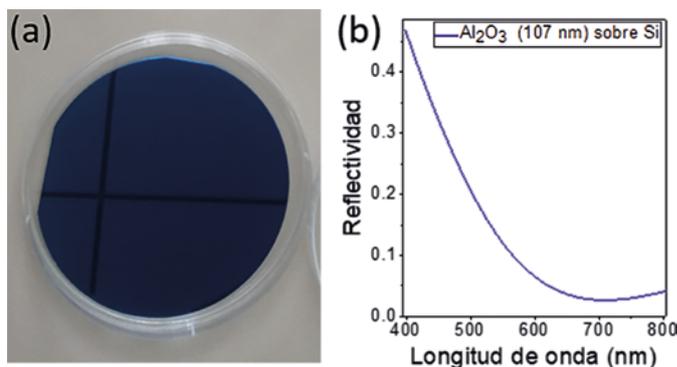


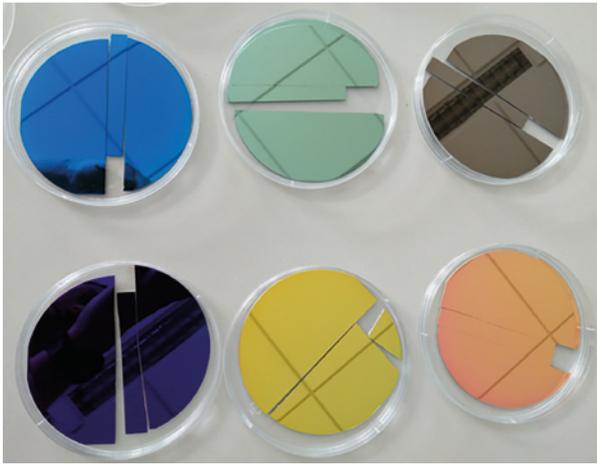
Fig. 7. (a) Foto y (b) espectro de reflectividad de una lámina delgada de óxido de aluminio crecida con el espesor adecuado sobre un sustrato de silicio para cumplir la condición de I.D en 700 nm.

#### 4. Reflectores de Bragg (cristales fotónicos 1D)

Acabamos de ver que con una lámina delgada se puede ampliar o reducir la reflectividad de un material en ciertas longitudes de onda, por el mismo fenómeno que se da en láminas iridiscentes. Ahora bien, el contraste entre los colores reflejados y los transmitidos no es total, porque es inevitable que una parte de la luz incidente sea transmitida a través de la lámina y no participe en la interferencia que se produce tras los procesos de reflexión.

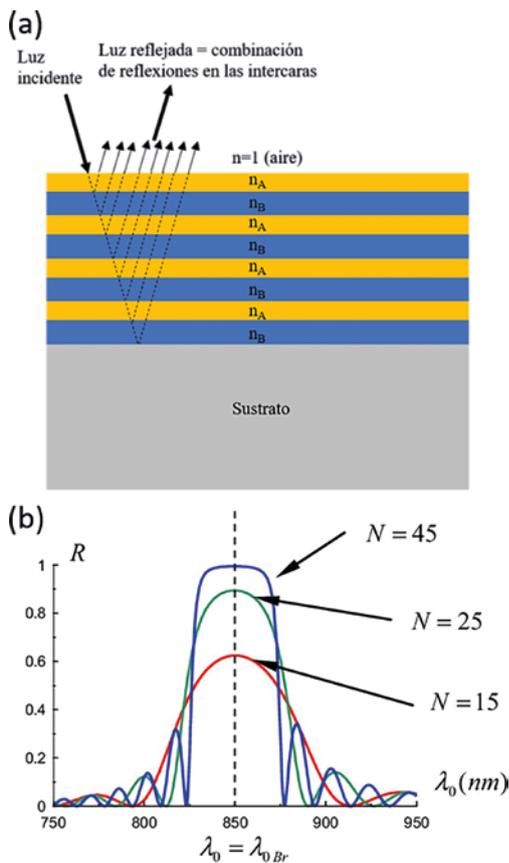
Planteamos por ello a los alumnos cómo se podría amplificar dicho contraste todo lo posible. No resulta complicado que entiendan que se podría hacer añadiendo capas reflectantes. En efecto, podemos crear varias láminas (Figs. 8 y 9) para colocarlas apiladas una sobre la otra, y de tal modo que las reflexiones “inter-lámina” estén en fase entre sí. Entonces, la luz se refleja y se refracta sucesivamente en cada una de ellas, potenciándose las interferencias entre las ondas reflejadas por las estructuras fotónicas.

Al decir esto acabamos de entrar de manera suave en un tema *a priori* complejo como es el de los cristales fotónicos, ya que estamos introduciendo unas estructuras fotónicas, que se basan en una repetición periódica de láminas delgadas de materiales de índice de refracción alto ( $n_a$ ) y bajo ( $n_b$ ). Cada lámina tiene un espesor que cumple la condición de  $d_i = \lambda_{Br}/4n_i$  para la longitud de onda en torno a la cual se desea que haya alta reflectividad, conocida como la longitud de onda de Bragg (nótese la analogía con la ley de Bragg en difracción de rayos X). Así se logra que las reflexiones sucesivas se encuentren en fase, y se puede alcanzar una reflecti-



**Fig. 8.** Distintas láminas delgadas de óxido de aluminio y/o óxido de titanio crecidas sobre un mismo sustrato (silicio) por el primer autor de este artículo. Las muestras de la fila de abajo combinan más de una lámina, logrando con ello reflejar en mayor medida el rango de  $\lambda$  (color) deseado.

vidad del 100 % en torno a  $\lambda_{Br}$  para un número suficiente de repeticiones (Fig. 9b). Tradicionalmente dichas estructuras se denominaron *reflectores de Bragg* y en clase podemos también llamarlas *cristales fotónicos 1D*, o de una dimensión<sup>1</sup>.



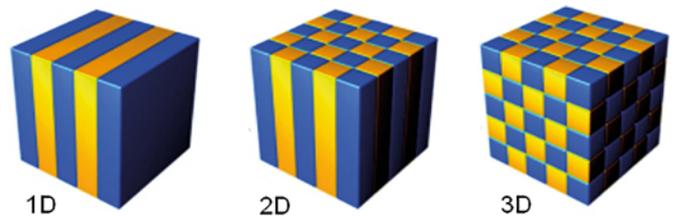
**Fig. 9.** (a) Esquema de un reflector de Bragg. (b) Espectros de reflectividad representativos de estos dispositivos [5], pudiendo lograr una reflectividad del 100 % en torno a la longitud de onda deseada.

1 Aunque este término no gusta a algunos expertos del campo, aparece en algunos artículos de investigación [4]. Consideramos que es un término adecuado para introducir aquí, pues permite conectar más fácilmente con los cristales fotónicos en 2D y 3D.

### 5. Cristales fotónicos 2D y 3D

Como ocurría en el caso de una lámina (ecuación 7a), el color que podemos ver reforzado debido a la I.C de las ondas reflejadas en estas estructuras cambia si lo hace el punto de observación. Como ejemplo extremo, si se observara el reflector de Bragg de la figura 9 en incidencia normal desde una perspectiva lateral en lugar de desde la vertical, no se tendría ninguna reflexión aparte de la de la intercara exterior.

Dicho esto, nos planteamos cómo se podría cambiar el diseño de estas estructuras para poder observar un color similar tanto desde la perspectiva vertical como desde la horizontal. La respuesta puede ser intuitiva para los estudiantes: ¿se podría diseñar con la misma periodicidad en la orientación horizontal? Tendríamos entonces una estructura semejante a la de un tablero de ajedrez. También podemos, idealmente, replicar el patrón periódico en el tercer eje (perpendicular al plano que contiene a los dos anteriores). Estas disquisiciones llevan a considerar de tres tipos posibles de cristales fotónicos, según su dimensionalidad: 1D, 2D o 3D (Fig. 10).



**Fig. 10.** Estructura básica de cristales fotónicos 1D, 2D y 3D.

Ahora bien: ¿logran realmente estos patrones (ya sea en 2D o en 3D) el objetivo de tener bandas de alta reflectividad en las mismas longitudes de onda (y por tanto un color similar), para cualquier punto de observación? No, pues observando, por ejemplo, desde las aristas del cubo en diagonal, tenemos un material más homogéneo.

Este tipo de dificultades han traído de cabeza a los investigadores. Mientras tanto, algunos ejemplos en la naturaleza han mostrado alternativas que desarrollan patrones exitosos, algunos de los cuales han servido de inspiración para desarrollar aplicaciones basadas en cristales fotónicos 2D y 3D.

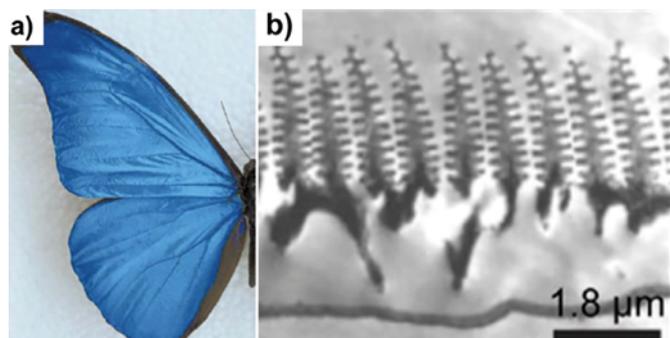
### 6. Color estructural y cristales fotónicos en el medio natural

Entendida la base de los cristales fotónicos, llega el momento de reformular en clase una pregunta básica realizada al inicio de la secuencia: ¿Hay ejemplos en la naturaleza en los que el color que observamos no tiene origen químico sino estructural?

Por supuesto, la respuesta es afirmativa: los cristales fotónicos existen en el medio natural y, además de encontrarse en un conócido mineraloide, el ópalo, producen colores estructurales en algunos seres vivos. Como toda característica biológica, el orden estructural de estas estructuras existentes en seres vivos no es casual, sino que les ofrece algunas ventajas evolutivas.

Un ejemplo de ello lo brindan muchas especies de mariposa *Morpho*, cuyos hábitats naturales se encuentran en varios países de Sudamérica y América Central, y que presentan como uno de sus rasgos más característicos el brillo azul de

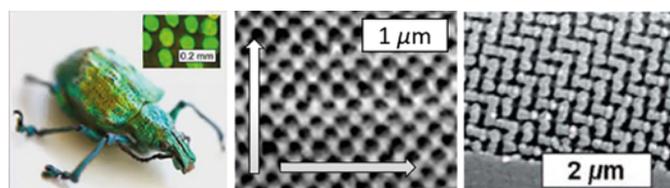
sus alas. Las imágenes de estas alas tomadas por un microscopio electrónico (Fig. 11), revelan su orden estructural en la nanoescala en más de una dimensión, causando su llamativo color iridiscente [6].



**Fig. 11.** (a) Imagen óptica de una mariposa *Morpho Rhetenor*. (b) Imagen SEM de la estructura fotónica de las alas de esta mariposa, responsable de su color azul [6].

En la mayoría de estas especies de mariposa, la intensa y poco habitual coloración azul solo se presenta en los machos, permitiendo su identificación hasta a medio kilómetro de distancia, lo que sugiere que dicho orden estructural ayuda a la comunicación visual entre los ejemplares de la misma especie y con otros animales. Probablemente se use con fines intimidatorios, además de como manera de atraer a las hembras de su especie.

Un efecto parecido ocurre con el escarabajo *Lamprocyphusaugustus*, cuyo complejo orden estructural en su exoesqueleto da lugar a su color verde. Su caparazón contiene la estructura de un cristal fotónico casi perfecto en tres dimensiones (Fig. 12).



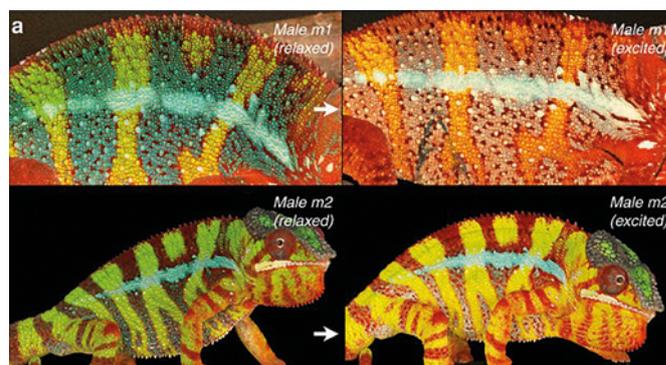
**Fig. 12.** Izda.: Foto e imagen ampliada del caparazón del escarabajo *Lamprocyphusaugustus*. Escala: 200 µm. Centro: Estructura de la superficie del caparazón (2D). Dcha.: Estructura de una sección transversal del caparazón (la tercera dimensión) [6].

Se cree que el orden estructural en estos escarabajos tiene un motivo más allá de lo visual: les permite moverse con menor fricción en entornos húmedos y pegajosos [6].

Así, las formas y las dimensiones de los patrones que forman estas estructuras fotónicas varían de especie a especie y la naturaleza ha desarrollado este tipo de estructuras complejas en varias especies de insectos, de reptiles, de aves, e incluso de peces, con distintos fines evolutivos.

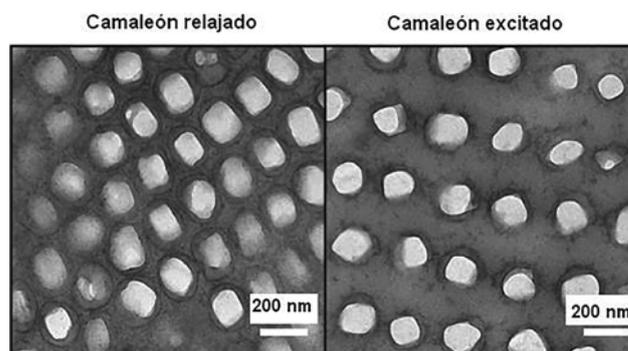
Una cuestión muy interesante es el hecho de que en algunos animales y bajo determinadas circunstancias, estas estructuras fotónicas naturales pueden cambiar, produciendo a su vez cambios en el color estructural. Así ocurre con el camuflaje del llamado camaleón pantera (*Furcifer pardalis*), que cambia de color gracias a una red activa de nanocrisales existentes en su piel. Investigadores de la Universidad de Ginebra enfrentaron a dos camaleones pantera de Madagascar

y midieron su cambio de color por técnicas de fotometría *in-vivo* y microscopía electrónica, entre otras [7]. Ambos machos pasaron de un color verde a un color amarillo-anaranjado en el estado excitado (Fig. 13)



**Fig. 13.** Cambio de color en dos camaleones pantera [9].

El mecanismo que produce este cambio de color es la modificación de la distancia existente entre cristales de guanina ( $n = 1.83$ ) ordenados en las células cromatóforas de su piel, que aumenta cuando el camaleón se excita. En el trabajo [7], se midió un cambio en la distancia promedio entre los cristales de guanina del camaleón de hasta el 30 %. (Fig. 14).



**Fig. 14.** Modificación de la estructura fotónica del camaleón pantera, según esté relajado (izquierda) o excitado (derecha) [9].

Es conocido que el cambio de color en los camaleones es muy útil para ellos, tanto para el camuflaje como para la competición entre machos.

Estos y otros ejemplos de color estructural en la naturaleza sirven de inspiración al diseño, desarrollo y producción artificial de cristales fotónicos.

### 7. Investigación en cristales fotónicos

Terminamos esta secuencia didáctica dando a conocer al alumnado algunos hitos de la investigación actual en cristales fotónicos.

Para empezar, hay que decir que los reflectores de Bragg o cristales fotónicos 1D se usan de forma habitual en muchos tipos de diodos láser desde los años 70 [8]. Incluso han sido recientemente empleados en los espejos del moderno interferómetro de detección de ondas gravitacionales *Advanced LIGO*, logrando reducir las pérdidas ópticas respecto a diseños anteriores [9]. Como es de esperar, en estas aplicaciones su función es reflejar de forma muy eficiente la frecuencia (o el rango de frecuencias) requerida por el dispositivo.

En cuanto a los cristales fotónicos de mayor dimensionalidad, encontraron su nicho de mercado pocos años después de que fueran planteados por primera vez en 1987, simultáneamente por Yablonovitch y John [10]. Debido a su gran variedad y versatilidad, solo esbozaremos aquí alguna de sus utilidades principales.

En la imagen adjunta (Fig. 15) se representa el corte de un cristal fotónico 2D, cuya estructura se ha roto “tapando” dos conjuntos ordenados de huecos, que forman sendos caminos. En estas condiciones, la luz que cumpla la condición de Bragg para el diseño periódico no puede propagarse por el mismo y se ve forzada a viajar por esos caminos.

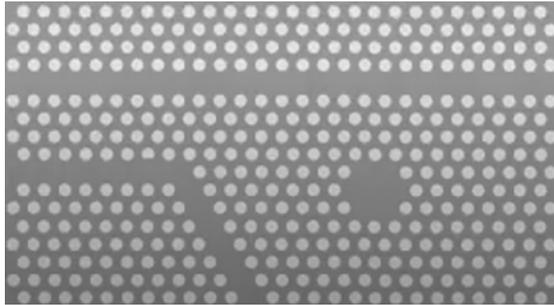


Fig. 15. Corte de un cristal fotónico bidimensional donde se han diseñado caminos transitables por la luz [11].

Así, se tiene la conocida como “fibra óptica de cristal fotónico”, para la longitud de onda deseada. A diferencia de una fibra óptica convencional, el guiado no se produce por la diferencia del índice de refracción entre el núcleo y el revestimiento, sino que se produce por los efectos de interferencia explicados anteriormente. Gracias a las características específicas por las que se produce el guiado, estas fibras son competitivas respecto a las fibras ópticas convencionales en diversas aplicaciones. Un esquema de una fibra de cristal fotónico se muestra en la figura 16.

La primera demostración de una fibra de cristal fotónico se publicó a finales de los años noventa [12], y hoy en día se pueden adquirir comercialmente, tanto para su uso como distintos componentes ópticos (guías de luz monomodo, filtros ópticos, etc.), como para sensores bioquímicos o de alguna

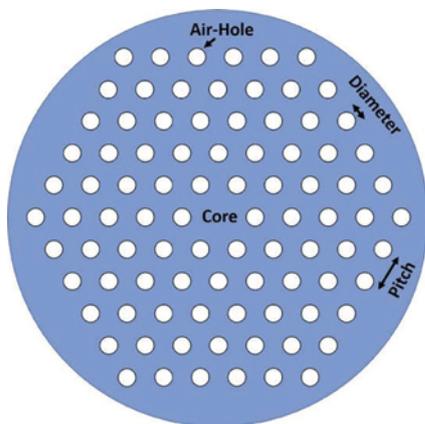


Fig. 16. Esquema del corte transversal de una fibra de cristal fotónico. El índice de refracción del material, el diámetro de los agujeros (*Air-Hole Diameter*) y la periodicidad de los mismos (*Pitch*), son los parámetros de la estructura fotónica que permiten el guiado de la(s) frecuencia(s) deseadas a lo largo del núcleo (*Core*) de la fibra [13].

magnitud física. Muchos de estos sensores se basan en monitorizar la modificación, debida al parámetro que medir, de las condiciones de I.C e I.D en el cristal fotónico.

También ha habido avances notables en cristales fotónicos 3D. Para que cumplan dicha definición de manera satisfactoria, su estructura debe ser periódica en las tres dimensiones y deben reflejar el rango de frecuencias deseado adecuadamente en todas las direcciones del espacio. Se sigue modelando y estudiado teóricamente decenas de estructuras exitosas, muchas de ellos inspiradas, como hemos comentado antes, en ejemplos del mundo natural [6, 14]. Se han fabricado varias de forma exitosa, aunque actualmente, su comercialización es muy limitada debido a su alto coste de fabricación. Sin embargo, su estudio es muy interesante más allá de la investigación básica, pues ofrecen características adicionales que podrían impulsar una verdadera revolución tecnológica, en particular para su uso en circuitos ópticos [4].

### Conclusión

En este artículo hemos desarrollado una propuesta de enseñanza-aprendizaje para acercar al alumnado de Bachillerato y de primeros cursos universitarios a una de las áreas más importantes de la fotónica, recorriendo conceptos que van desde la generación natural del color a base de pigmentos o del orden estructural hasta el interesante y significativo mundo de los cristales fotónicos. Esta propuesta no se ciñe únicamente a conceptos y aplicaciones de la Física, sino que incorpora también en nociones relacionadas con las ciencias de la vida.

Estamos convencidos de que estos conocimientos pueden despertar mucho interés en el alumnado, al acercarlo a un tema de investigación actual que es comprensible usando conocimientos básicos de óptica física. Los estudiantes, además de reforzar y ampliar dichos conocimientos, podrán valorar la utilidad de la observación y la indagación de fenómenos físicos atractivos en el mundo tecnológico actual.

### Adenda

Consideramos que parte de lo tratado en este artículo es interesante para el público fuera de las aulas. Al no observar apenas divulgación relacionada con los cristales fotónicos en la conocida plataforma YouTube, los autores contactaron con la investigadora y divulgadora Andrea Peralta Somoza, que realizó un vídeo en dicha plataforma [11] en el que muestra las interesantes propiedades de los cristales fotónicos y algunos ejemplos de los mismos en el mundo natural y en el industrial. Los autores quieren agradecer a Andrea su predisposición y las ideas que aportó durante la realización de este vídeo.

### Referencias

- [1] M. ZIA-UL-HAQ, S. DEWANJEE, y M. RIAZ, “Carotenoids: Structure and Function in the Human Body”, *Springer Nature*, 2021.
- [2] A. LUIS AINA, “Un interferómetro de talco”, en la web Fenómenos ópticos cotidianos (<https://webs.ucm.es/info/gioq/fenopt/imagenes/interferencialco/index.htm>).
- [3] R. GARCÍA-MOLINA y H. PÉREZ GARCÍA, “Iridiscencias caseras”, en la web Ciencia en Acción (<http://anteriores.cienciaenaccion.org/es/2003/experimento-186/iridiscencias-caseras.html>).
- [4] L. D. HARET, T. TANABE, E. KURAMOCHI y M. NOTOMI, “Extremely Low Power Optical Bistability in Silicon Demonstrated Using 1d Photonic Crystal Nanocavity”, *Optics express*, 17(23), 21108-21117, 2009.

- [5] H. V. BAGHDASARYAN, T. M. KNYAZYAN, T. T. HOVHANNISYAN, T. BAGHDASARYAN, A. V. DARYAN y M. MARCINIAK, "Electromagnetic Energy Flow in Confined Regions of Evanescent Waves: Wavelength-Scale Analysis by the Method of Single Expression", *Optical and Quantum Electronics*, 51(9), 1-12, 2019.
- [6] F. P. BARROWS y M. H. BARTL, "Photonic Structures in Biology: A Possible Blueprint for Nanotechnology", *Nanomaterials and Nanotechnology*, 4, 1, 2014.
- [7] J. TEYSSIER, S. V. SAENKO, D. VAN DER MAREL y M. C. MILINKOVITICH, "Photonic Crystals Cause Active Colour Change in Chameleons", *Nature communications*, 6(1), 1-7, 2015. (Recomendamos ver los vídeos que aparecen en la "supplementary information").
- [8] S. WANG, "Principles of Distributed Feedback and Distributed Bragg-Reflector Lasers", *IEEE Journal of Quantum Electronics* 10(4), 413-427, 1974.
- [9] G. CAGNOLI, L. PINARD, C. MICHEL, B. SASSOLAS, J. DEGALLAIX, M. GRANATA y D. FOREST, "Advanced optical coatings for the discovery of gravitational waves", 2017, en la web de noticias de la International Society for Optics and Photonics (SPIE) (<https://spie.org/news/6767-advanced-optical-coatings-for-the-discovery-of-gravitational-waves?SSO=1>).
- [10] E. YABLONOVITICH, "Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics", *Physical review letters*, 58(20), 2059, 1987, y S. JOHN, "Strong localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices", *Physical review letters*, 58(23), 2486, 1987.
- [11] A. PERALTA SOMOZA, "Cristales Fotónicos, una review 100% chachi (ft. @Sábados Culturetas)", en el portal YouTube <https://www.youtube.com/watch?v=wisSG0CZvUY>
- [12] J. C. KNIGHT, T. A. BIRKS, P. S. J. RUSSELL y D. M. ATKIN, "All-silica Single-Mode Optical Fiber with Photonic Crystal Cladding." *Optics letters*, 21(19), 1547-1549, 1996.
- [13] S. CHUGH, A. GULISTAN, S. GHOSH y B. M. A. RAHMAN, "Machine Learning Approach for Computing Optical Properties of a Photonic Crystal Fiber", *Optics Express*, 27, 36414-36425, 2019.
- [14] R. K. CERSONSKY, J. ANTONAGLIA, B. D. DICE y S. C. GLOTZER, "The diversity of three-dimensional photonic crystals", *Nature communications*, 12(1), 1-7, 2021.

## El calendario de los *hobbits* como recurso docente

Javier Vaquero Martínez  
Dpto. de Física,  
Universidad de Extremadura



El mundo ficticio de *El Señor de los Anillos* puede ser utilizado como un recurso docente atractivo para los estudiantes mediante el cual pueden aprender sobre temáticas relacionadas con la astronomía y la medición del tiempo. En particular, se estudia en detalle el calendario creado por J. R. R. Tolkien para hombres y *hobbits* y se compara

con el calendario gregoriano que utilizamos en nuestra sociedad.

### Introducción

Los calendarios son herramientas indispensables para la regulación y la planificación de las diferentes sociedades de nuestro planeta. Desde épocas remotas, cualquier forma de organización social ha necesitado de un calendario para establecer sus fiestas, sus fechas importantes, los momentos de siembra y recolecta, etc. Sin embargo, la creación de un calendario es una tarea ardua y compleja. Pensemos en un mundo en el que no sabemos nada sobre cuánto dura un día, o cuánto un año y, además, sin relojes precisos. El lector interesado puede consultar una enorme bibliografía sobre este tema tanto en inglés [1-3] como en español [4-6].

El tiempo es una magnitud física muy intangible. Tradicionalmente, la Oficina Internacional de Pesos y Medidas de París ha conservado patrones de las magnitudes fundamentales como el kilogramo (un cilindro de una aleación de platino e iridio) o el metro (una vara de una aleación similar) aunque ahora mismo este tipo de patrones ha desaparecido. Nos podemos preguntar: ¿cómo conservar un segundo? Desde la antigüedad, ya el hombre se dio cuenta de que el patrón debe ser un evento que ocurra periódicamente. De hecho, existen muchos eventos periódicos en los fenómenos astronómicos. Nuestro calendario actual, el calendario gregoriano, utiliza estos patrones, aunque ya existan formas más precisas de medir el tiempo.

J. R. R. Tolkien, el autor de la conocida saga de *El Señor de los Anillos*, creó un mundo de ficción muy completo [7], cuidando los más mínimos detalles [8]. En sus libros, podemos encontrar mapas, pueblos, historias de los tiempos antiguos, lenguas, etc. Por ejemplo, podemos incluso estudiar el clima de los territorios donde se desarrollan los acontecimientos [9] gracias al gran nivel de detalles con que Tolkien describe la Tierra Media a lo largo de una historia épica que narra desde el origen del mundo hasta el final de la Tercera Edad, momento en que acaba el último libro de la saga, *El Retorno del Rey*. Tolkien también inventó distintas lenguas para los distintos pueblos de elfos, hombres, enanos, *hobbits* e, incluso, orcos. Por supuesto, el calendario no iba a ser menos.

En este trabajo, presentamos el funcionamiento de uno de los calendarios que Tolkien creó y que mostró en los Apéndices de *El Señor de los Anillos*. Puede ser un trabajo interesante para alumnos de secundaria estudiar este calendario desde una perspectiva interdisciplinaria combinando física, astronomía, literatura, ciencias naturales y matemáticas. La gran ventaja de los calendarios de Tolkien es que se asume que los territorios de la saga están en el planeta Tierra y, por lo tanto, los aspectos astronómicos de estos calendarios son similares a los nuestros, incluido el calendario gregoriano que usamos en la cultura occidental.

### Calendarios en el mundo de Tolkien

Tolkien no solo creó mapas, tierras, lenguas, razas e historias para su mundo fantástico, sino que además creó varios calendarios para los distintos habitantes de la Tierra Media. Tenemos información sobre los calendarios de *hobbits*, hombres y elfos en el Apéndice D de *El Señor de los Anillos*. En este trabajo nos centraremos en el calendario que utilizaban