

UN UNIVERSO DE LUZ

2015, AÑO INTERNACIONAL DE LA LUZ

Coordinación general y producción

Vicepresidencia Adjunta de Cultura Científica del CSIC. Pilar Tígeras, Jaime Pérez, Laura Llera, Belén Macías

Comisaria técnica Paloma Arroyo

Comisario científico Joaquín Campos

Textos y asesoría científica Carmen Nieves Afonso, Javier Alda, Juan Diego Ania, Sergio Barbero, Emilio José García, José María González Cuasante, María Viñas, Abengoa

Diseño y maquetación underbau

Imágenes e ilustraciones ver créditos

Más información en www.luz2015.es

↑ Arcoíris primario y secundario sobre el embalse de Lipno (República Checa). **Imagen** Alexis Dworsky.



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD



CSIC



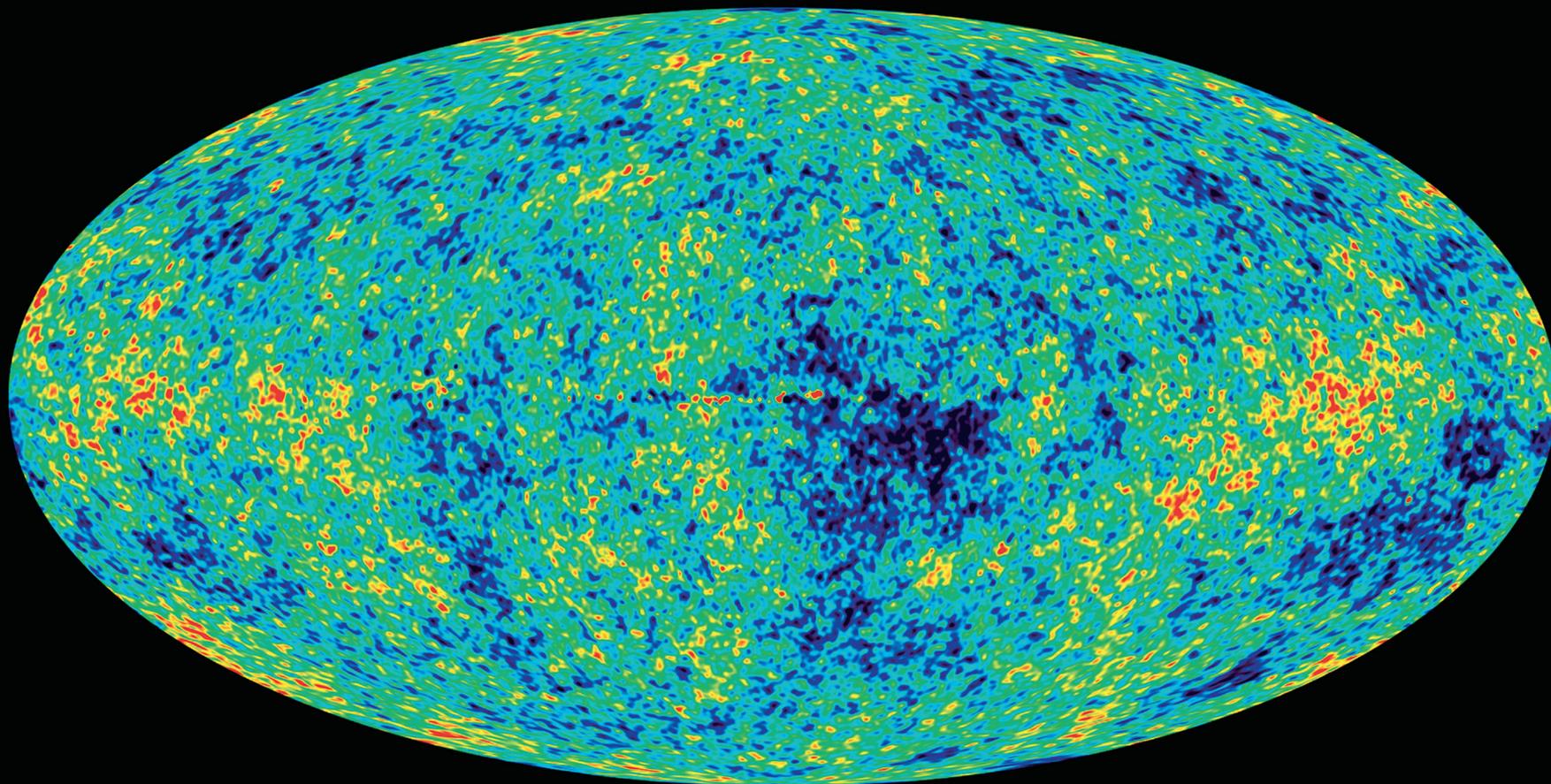
FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA



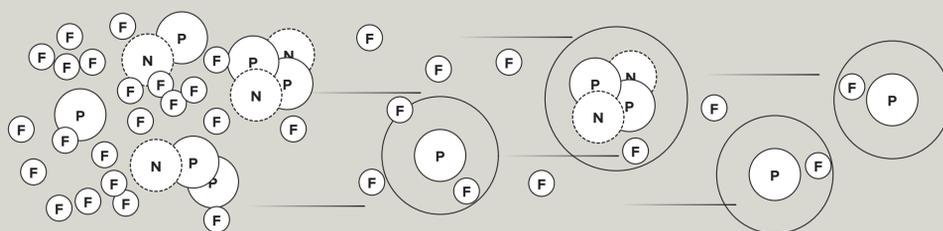
AÑO INTERNACIONAL DE LA LUZ 2015

↓ La luz del universo cuando apenas contaba con unos 372.000 años de edad. Es el fondo cósmico de microondas, la luz más antigua que existe.

Imagen Fondo cósmico de microondas. @ESA & Planck Collaboration.



Sopa de partículas



← Sopa de partículas en la que los protones, neutrones y electrones libres van formando átomos. Los fotones escapan y conforman la radiación cósmica de fondo.

01

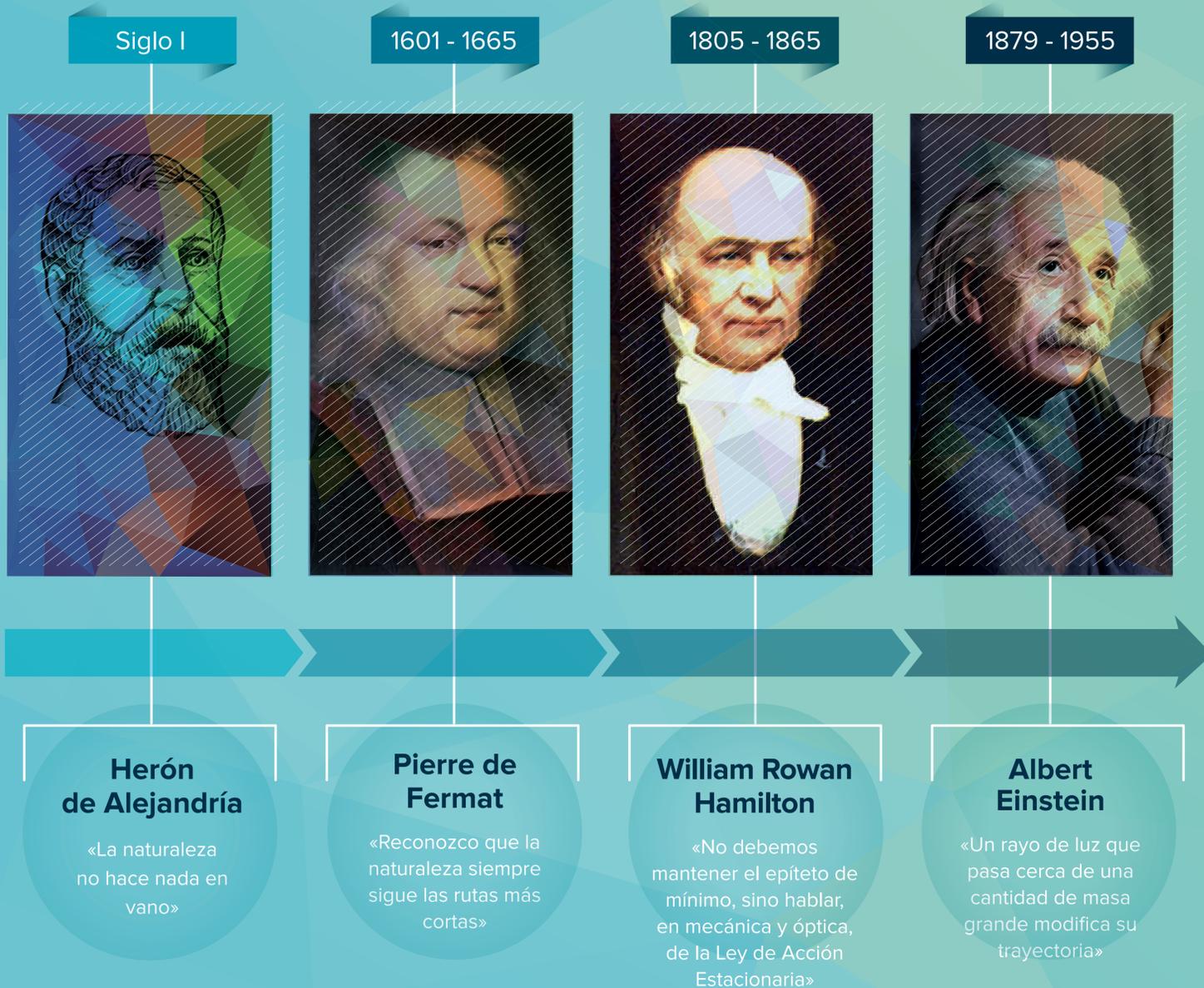
LA PRIMERA LUZ DEL COSMOS

Según el modelo cosmológico más aceptado, **el universo nació hace unos 13.800 millones de años a partir de una etapa inicial en la que era infinitamente pequeño y caliente.** Desde ese instante comenzó a expandirse y a evolucionar. No había transcurrido ni la billonésima parte de un segundo cuando surgieron las primeras partículas fundamentales, entre ellas los fotones, es decir, la primera luz del cosmos. Pero, paradójicamente, esa luz no podía iluminar nada.

Además de contener fotones, el universo era todavía una **densa sopa de electrones y protones libres.** La densidad de partículas era tan alta que un fotón apenas podía recorrer una minúscula distancia sin ser rápidamente absorbido o dispersado en otra dirección. Todo era opaco.

El universo continuó su expansión y, transcurridos los primeros 300.000 años, la temperatura descendió lo suficiente como para que protones y electrones comenzaran a formar los primeros átomos de hidrógeno y de helio. La capacidad de estos átomos para dispersar y absorber fotones no era tan alta y los fotones comenzaron a poder viajar en línea recta grandes distancias sin interacción. **Así, el universo se hizo transparente y la luz comenzó a iluminar el cosmos.**

Esa luz es la que nos acompaña desde entonces. Inunda el espacio en todas direcciones y, debido a la expansión, su temperatura actual es de aproximadamente 270 grados bajo cero y se sitúa en el rango de las microondas. **Esta luz primigenia esconde la respuesta a muchos de los enigmas de la cosmología actual.**

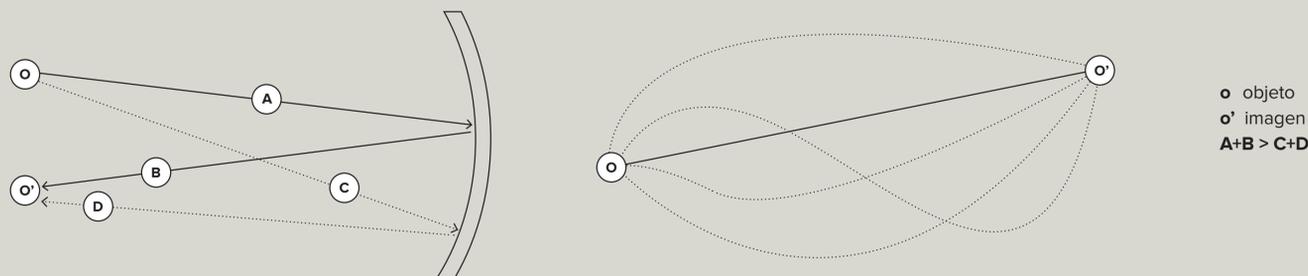


→ Ilustración Raúl Gómez Estudio.



La propagación de los rayos de luz

→ El gráfico de la izquierda muestra el camino más largo de un rayo de luz y el de la derecha el más corto.



02

LOS CAMINOS ÓPTICOS

Uno de los principios de más hondura de la física es aquel que establece que **los objetos se mueven siguiendo las trayectorias más cortas, o bien, por muy sorprendente que parezca, las más largas.** El estudio de la propagación de la luz a lo largo de la historia fue determinante para descubrir este principio.

Herón de Alejandría afirmó en el siglo I que la luz se movía siguiendo la ruta más corta, ya que «la naturaleza no hace nada en vano». En 1662 **Pierre de Fermat** modificó la idea de Herón; la luz sigue no el camino físico de menor longitud sino el más rápido (en el mínimo tiempo). Esto es equivalente al mínimo camino óptico, es decir, el camino físico teniendo en cuenta lo que le cuesta a la luz propagarse por un medio determinado por su mayor o menor densidad.

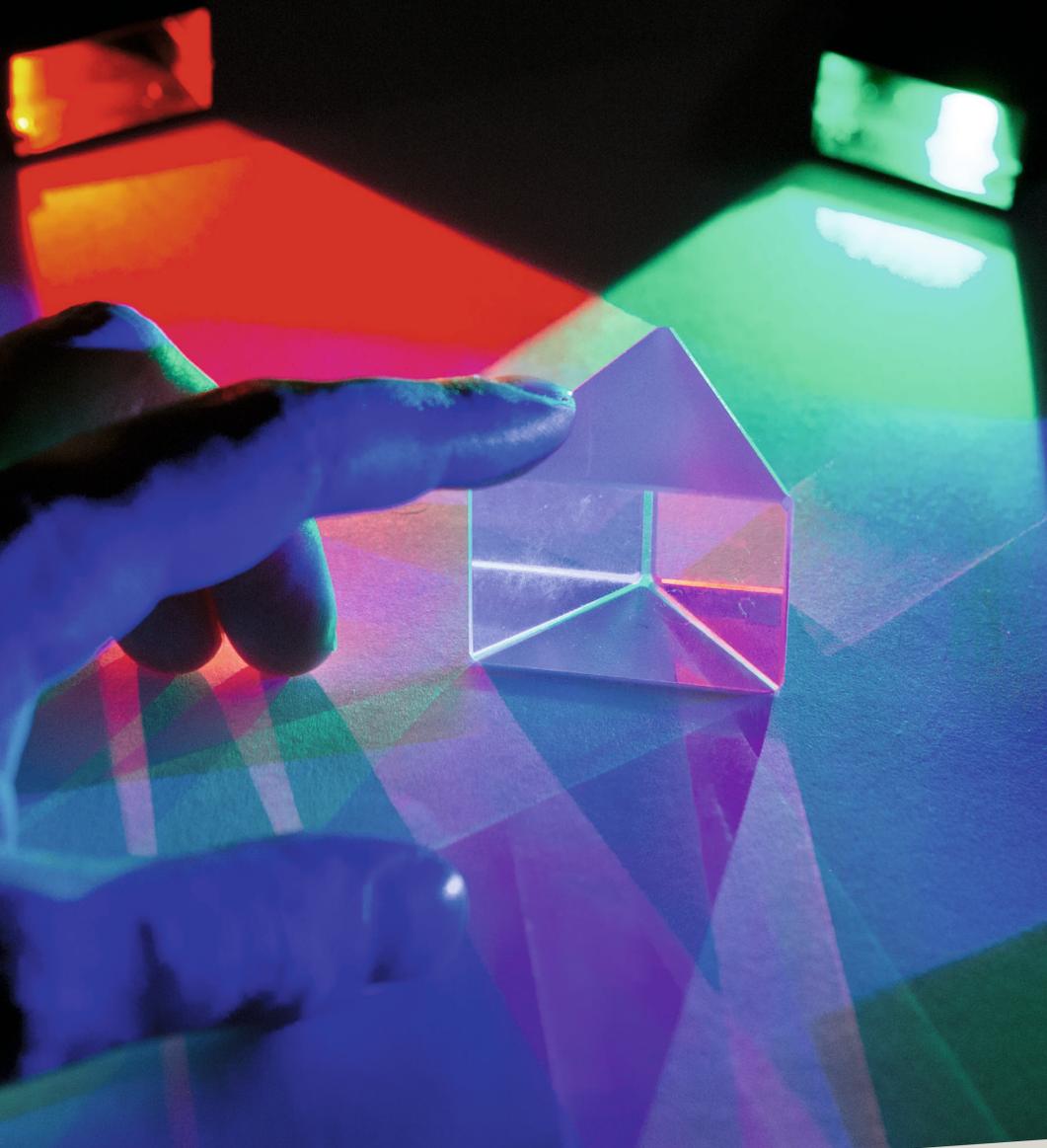
Con el tiempo, estas ideas evolucionarían hasta que **Rowan Hamilton** en el siglo XIX estableció un principio aún más general que dice que la luz sigue un camino óptico estacionario, normalmente uno extremo, esto es, o el más corto o el más largo. Un ejemplo de este caso es la trayectoria que sigue un rayo de luz que, partiendo de un punto objeto, se refleja en un espejo esférico cóncavo para formar una imagen.

La última novedad, en este largo camino de la historia de la luz, la proporciona la teoría de la relatividad de **Einstein**, que habla de trayectorias de luz extremas no en el espacio ¡sino en el espacio-tiempo!



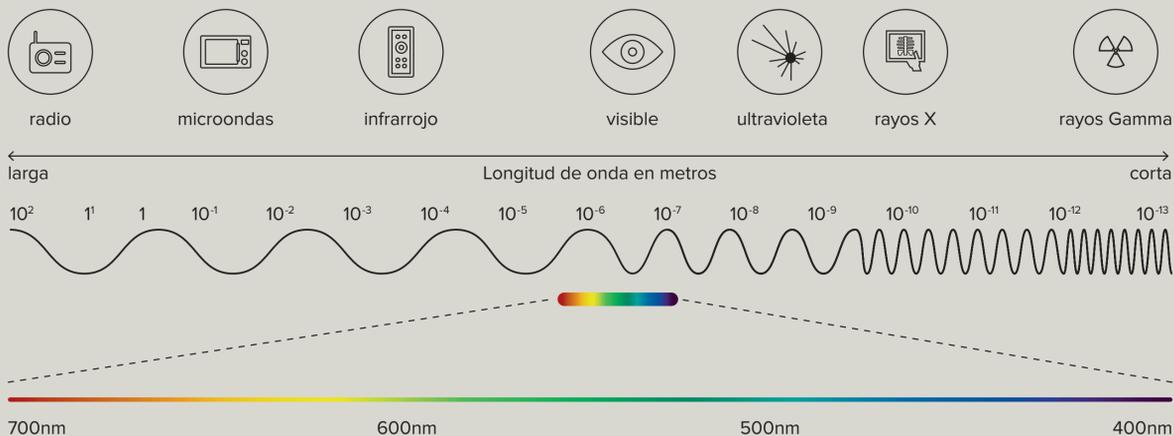
El color que percibimos de una determinada radiación depende de su longitud de onda. Cuanto menor es la distancia entre crestas (menor longitud de onda), más rápidamente oscila el campo electromagnético (mayor frecuencia). Longitudes de onda mayores se corresponden con el rojo y menores, con el violeta

→ Si hacemos pasar una luz blanca por un prisma, veremos que se descompone en los colores del arcoíris (fenómeno denominado dispersión). El color que observamos de un objeto sería la parte de luz blanca que no ha absorbido y, por ello, que refleja o transmite según el caso. **Imagen** Actividad del IOSA en la Semana de la Ciencia en el Instituto de Óptica del CSIC. Juan Aballe. Cultura Científica CSIC.



El espectro electromagnético

→ El espectro electromagnético es el conjunto de todas las posibles longitudes de onda de la radiación electromagnética. Normalmente denominamos luz a la sección del espectro electromagnético que abarca la radiación ultravioleta, la visible y la infrarroja. La luz visible sería la parte del espectro de la luz que incluye los colores que podemos distinguir con nuestros ojos.



03

PARTÍCULAS, ONDAS... ¿QUÉ ES LA LUZ?

En física clásica, una **partícula** se caracteriza por tener una posición definida en un instante, **como una piedrecilla**, mientras que una **onda** es una perturbación que se propaga, **como las oscilaciones que produce esa piedrecilla al caer a un lago**, y que se caracteriza por parámetros como su velocidad de propagación, su amplitud y su frecuencia.

Aunque en nuestro mundo estamos acostumbrados a diferenciar entre partículas y ondas, hoy en día comprendemos, gracias a la física cuántica, que esa división es solo aparente, y que **las partículas pueden comportarse como ondas y como partículas**.

La luz, de ese modo, puede considerarse al mismo tiempo como un haz de partículas sin masa llamadas **fotones** que transportan energía de un lugar a otro, y como una serie de **ondas electromagnéticas** asociadas a esos fotones. Las ondas electromagnéticas son oscilaciones del campo eléctrico y magnético que se propagan a la máxima velocidad posible.

La cantidad de energía que transporta cada fotón determina la **longitud de onda** de su correspondiente onda electromagnética, que es la distancia entre dos crestas adyacentes en la amplitud del campo electromagnético.



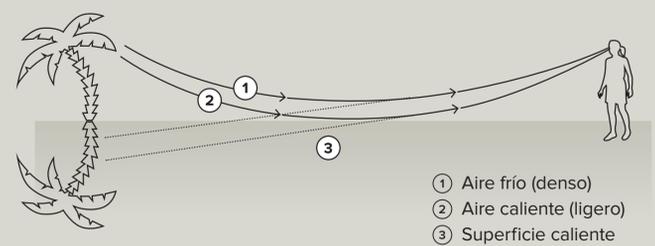
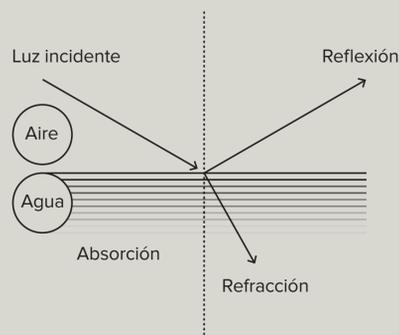
Debido a las diferentes densidades del aire frío y el aire caliente, los espejismos que se producen en desiertos o carreteras hacen ver no solo agua donde no la hay, sino también otros elementos que parecen encontrarse dentro de ella y que en realidad se encuentran por encima

→ Imagen iStock.



Reflexión, refracción y absorción de la luz

→ Al atravesar la superficie de separación entre el aire y el agua, la luz se refleja como en un espejo (reflexión), se transmite hacia el agua (refracción), y dentro de ella se absorbe y dispersa a medida que se propaga (absorción y dispersión), lo que provoca que vaya perdiendo intensidad.



04

¿QUÉ ES UN ESPEJISMO?

Cuando la luz viaja en el vacío (por ejemplo, en el espacio interestelar) su velocidad es la máxima posible: 299.792.458 metros por segundo. En el aire va un poco más despacio y conforme la temperatura disminuye también lo hace la velocidad de la luz.

Para entender por dónde va la luz siempre es buena idea comenzar con lo más fácil. En este sentido, podemos empezar por decir que la luz se propaga en línea recta. Sin embargo, no siempre es así, sobre todo cuando tiene que atravesar medios en los que su velocidad de propagación cambia.

En un espejismo, por ejemplo, la luz cambia de trayectoria (se dobla) al atravesar las capas de aire a distinta temperatura. En días muy calu-

rosos el suelo está muy caliente y el aire tiene menor densidad conforme nos acercamos a él. Debido a ello, la propagación de la luz a través de esos estratos de aire hace que parezca que aquellos objetos que están sobre el suelo estén dentro de él. Como el aire es un fluido sujeto a turbulencias, el aspecto de esta imagen cambia y la ilusión es similar a la que produciría una superficie de agua.

Las **leyes de la refracción** que explican los espejismos, junto con la ley de la **reflexión** en los espejos, permiten diseñar y crear lentes e instrumentos ópticos capaces de proporcionar imágenes o de concentrar la luz en determinados lugares. En este ámbito, la geometría nos ayuda a entender mejor a dónde va la luz y cómo se forman las imágenes.



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD



CSIC



FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA



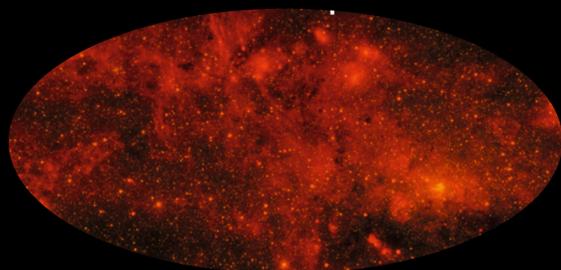
AÑO INTERNACIONAL DE LA LUZ 2015



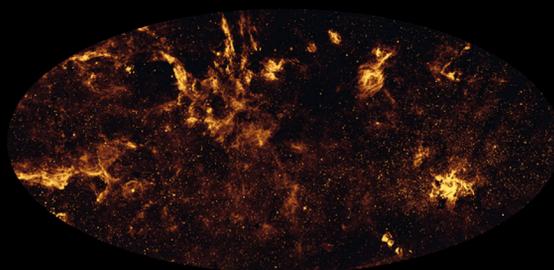
La luz es una extraordinaria mensajera de conocimiento y nuestra herramienta fundamental para responder a muchas de las incógnitas sobre cómo es el Universo

↓ La imagen superior muestra una vista del centro de la Vía Láctea que resulta de la combinación de las tres imágenes inferiores, tomadas por separado con tres de los mayores telescopios espaciales. Cada uno de ellos observa y fotografía el cielo en una longitud de onda distinta: el Spitzer

Space Telescope en el rango de los infrarrojos, el Hubble Space Telescope en el espectro visible y el Chandra X-Ray Observatory en la longitud de onda de los rayos X. **Imagen** Great Observatories Unique Views of the Milky Way. NASA, JPL-Caltech, ESA, SSC, CXC, STScI.



Spitzer / Infrarrojo



Hubble / Espectro visible



Chandra / Rayos X

05

UNA VIAJERA EN EL TIEMPO

Durante milenios, el ser humano concebía el cosmos como una vasta región oscura en la que flotaban multitud de puntos luminosos, llamados estrellas, cuya naturaleza era totalmente desconocida e inaccesible.

Gracias a los telescopios, auténticos ‘recolectores’ de luz, y a las técnicas de imagen y espectroscopía, los astrónomos pueden analizar toda la información contenida en la radiación emitida por los astros. **Esta luz ha podido recorrer distancias inimaginables y tardar millones de años en llegarnos.** Una auténtica viajera en el tiempo que nos muestra tanto el presente del Universo como su pasado.

Hoy en día, gracias a la luz, tenemos una imagen bastante completa de cómo es el Universo: de la estructura interna de las estrellas y las reacciones termonucleares que ocurren en su interior, causantes de su brillo; del movimiento de las galaxias y las inabarcables distancias a las que se encuentran; de cuál es nuestro lugar en el Universo y de dónde proceden los elementos químicos que nos forman.

También hemos podido estudiar **cómo evoluciona el Universo**, su pasado y su futuro, e incluso su composición, dominada paradójicamente por dos elementos que no emiten radiación alguna: la materia y la energía oscura, cuya existencia también descubrimos gracias a la luz.



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD



CSIC

FECYT

FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA



AÑO INTERNACIONAL DE LA LUZ 2015



El cielo es de color predominantemente azul porque la mayoría de las moléculas de la atmósfera dispersan más eficazmente este color del espectro solar que el resto

→ Aurora boreal sobre el lago Bear (Alaska, EE UU). Imagen United States Air Force. Joshua Strang.

06

AURORAS POLARES, ARCOÍRIS Y OTROS EFECTOS ÓPTICOS

La atmósfera terrestre, además de ser fundamental para la vida en el planeta, es el hogar de una gran variedad de fenómenos ópticos, algunos tan sobrecogedores como las **auroras polares**. Estas impresionantes cortinas de color son producidas por la interacción de partículas procedentes del Sol con los compuestos de oxígeno y nitrógeno de la alta atmósfera (termosfera), tras haber sido previamente desviadas a los polos por la magnetosfera, el campo magnético que envuelve la Tierra.

Pero en general, es la luz del Sol –y no sus partículas– la que se halla detrás de la mayoría de los fenómenos ópticos que comúnmente observamos en la troposfera, la capa más baja de la atmósfera.

Por ejemplo, **el abanico de color característico del arcoíris se genera cuando la luz solar atraviesa gotas de lluvia y se refracta de manera diferente según la longitud de onda**. Algo similar ocurre con los halos luminosos, producidos cuando existen pequeños cristales de hielo en suspensión que refractan la luz de nuestra estrella.

Pero no todos los efectos luminosos de la atmósfera son causados por el Sol. Las tormentas eléctricas generan también fenómenos lumínicos, algunos tan esquivos como los denominados **‘duendes’, ‘elfos’ o ‘chorros azules’**, que se dan en las capas altas de la atmósfera y cuyo reciente descubrimiento ha abierto todo un nuevo campo de investigación.



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD



CSIC

FECYT

FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA



AÑO INTERNACIONAL DE LA LUZ 2015



El color que presenta un vegetal depende del predominio de un pigmento o la combinación de varios. El verde de las hojas se debe a la presencia de la clorofila que es fundamental para la fotosíntesis e indicativo de su buena salud

→ Imagen Real Jardín Botánico, CSIC.

07

EL COLOR DE LAS PLANTAS

La mayoría de las plantas sanas son verdes porque contienen clorofila, pigmento que refleja la componente verde de la luz y absorbe las componentes azul y roja. Aunque una pequeña parte de esta luz absorbida se disipa en forma de fluorescencia, la mayoría se emplea en activar la fotosíntesis, que es el proceso que mantiene vivas las plantas y hace que crezcan.

La mayoría de las frutas y verduras son verdes y a medida que van madurando se producen **cambios metabólicos que conllevan cambios en la coloración**, porque se degrada la clorofila y aparecen otros pigmentos, como carotenos y antocianinas,

que aportan colores desde el amarillo pálido, hasta el anaranjado y el rojo oscuro. Estos pigmentos son vitales no solo para la autoprotección de la planta, sino también para la salud de los humanos por sus **efectos antioxidantes**.

Las plantas enfermas pueden experimentar cambios en la composición de sus pigmentos. Ello hace que cambien de color o emitan luz a longitudes de onda diferentes que las plantas sanas. Estas características espectrales se convierten en muchos casos en **'huellas dactilares' de la enfermedad** que padece la planta y se utilizan como diagnóstico para controlar su salud.



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD



CSIC

FECYT

FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA



AÑO INTERNACIONAL DE LA LUZ 2015

↓ La medusa *Aequorea victoria* o gelatina de cristal brilla con unos llamativos destellos de fosforescencia azul. La proteína causante de este comportamiento se denomina proteína verde fluorescente (GFP, por sus siglas en inglés) y se ha convertido en un marcador muy versátil para estudiar gran cantidad de procesos biológicos en microbiología, ingeniería genética, fisiología o ingeniería ambiental. Los descubridores de la GFP y sus propiedades, Osamu Shimomura, Martin Chalfie y Roger Y. Tsien, fueron galardonados en 2008 con el Premio Nobel de Química. **Imagen** *Aequorea victoria*. Takeshima Aquarium, Japón.



08

BIO- LUMINISCENCIA: LA VIDA A OSCURAS

La luz es esencial para la vida. Cuando escasea, los seres vivos tienen que adaptarse para sobrevivir. Así, aun en la oscuridad hay formas de vida capaces de adaptarse a estas condiciones extremas y generar su propia luz. La bioluminiscencia **es la producción y emisión de luz visible por un organismo vivo** gracias a una reacción química ocurrida en su interior: la enzima luciferasa cataliza la oxidación de la **luciferina, una proteína que emite luz pero que no produce calor**, lo que hace que sea eficiente energéticamente.

Se trata de un fenómeno muy extendido en todos los niveles biológicos: en ciertas especies de bacterias, hongos, insectos, gusanos, moluscos, cefalópodos, crustáceos, equinodermos y peces, entre otros. El espectro de emisión varía en función de la especie y de las condiciones del entorno, aunque

el 80% de las especies animales bioluminiscentes habitan los océanos, donde han desarrollado variados sistemas de emisión de luz.

La bioluminiscencia **se utiliza en el reino animal como medida de defensa y ataque o con el objetivo de comunicarse o reproducirse**. Hay animales que controlan la luminosidad de su cuerpo para hacerla similar a la del fondo del mar o expulsan nubes de material luminescente con el propósito de distraer o repeler a un posible depredador, mientras el animal escapa a un lugar seguro. Ciertos animales marinos brillan cuando detectan un depredador, haciéndole más vulnerable al atraer la atención de los depredadores de los niveles tróficos superiores. Algunos depredadores de aguas profundas usan asimismo esta habilidad como señuelo para atraer a sus presas.



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE ECONOMÍA
Y COMPETITIVIDAD



CSIC



FUNDACIÓN ESPAÑOLA
PARA LA CIENCIA
Y LA TECNOLOGÍA



AÑO
INTERNACIONAL
DE LA LUZ 2015

Diagnóstico

Tratamiento

NEUROLOGÍA

- Visualización de las estructuras cerebrales
- Detección de enfermedades neurovasculares y enfermedades neuronales degenerativas

OFTALMOLOGÍA

- Diagnóstico de patologías oculares

CARDIOLOGÍA

- Pronóstico y evaluación del tratamiento en enfermedades coronarias
- Detección de oclusiones vasculares

ONCOLOGÍA

- Diagnóstico y seguimiento de la terapia en todo tipo de procesos cancerígenos

CIRUGÍA

- Endoscopias exploratorias para diagnóstico interno de tejidos y órganos

OFTALMOLOGÍA

- Cirugías refractivas y de cataratas
- Tratamiento de heridas oculares
- Regeneración de tejidos oculares
- Unión de tejidos por láser

ODONTOLOGÍA

- Limpieza dental
- Blanqueamiento
- Curado de empastes

DERMATOLOGÍA

- Depilación, eliminación de arrugas, tratamiento de varices, acné, celulitis, eliminación de tatuajes
- Tratamiento de enfermedades como psoriasis o hiperbilirrubinemia

FARMACOLOGÍA

- Descubrimiento de nuevos fármacos: desarrollo y evaluación
- Cuantificación de la interacción a nivel molecular
- Caracterización de procesos biológicos específicos
- Nuevos marcadores y estudios de distribución

CIRUGÍA

- Cirugías guiadas por imagen, microscopios quirúrgicos y elementos de posicionamiento de herramientas quirúrgicas
- Unión de tejidos por láser
- Eliminación de tejidos cancerosos

ONCOLOGÍA

- Terapia fotodinámica para eliminación de tejidos cancerosos
- Tratamiento con láser de baja potencia aplicado en la zona de interés

→ Ilustración Raúl Gómez Estudio.

09

LA LUZ EN LA MEDICINA

La **biofotónica** estudia la interacción de la luz y de otras formas de energía radiante con materiales biológicos, y se ocupa de la generación y uso de la luz para tomar imágenes, detectar patologías y manipular este tipo de materiales. Dependiendo de la longitud de onda y la potencia de la luz utilizada, podemos diferenciar entre dos aplicaciones: las que usan la luz para excitar la materia y así obtener información de la misma, y las que usan la luz para transferir energía a los tejidos y modificarlos.

Las técnicas de diagnóstico por imagen óptica utilizan **luz para obtener de manera no invasiva imágenes detalladas** de órganos, tejidos y moléculas. Son usadas en neurología, cirugía, oncología, cardiología, oftalmología, farmacología u odontología, entre otras disciplinas. Ejemplos de

ello son la endoscopia, la imagen fotoacústica, la espectroscopía Raman o la microscopía de superresolución, entre otras.

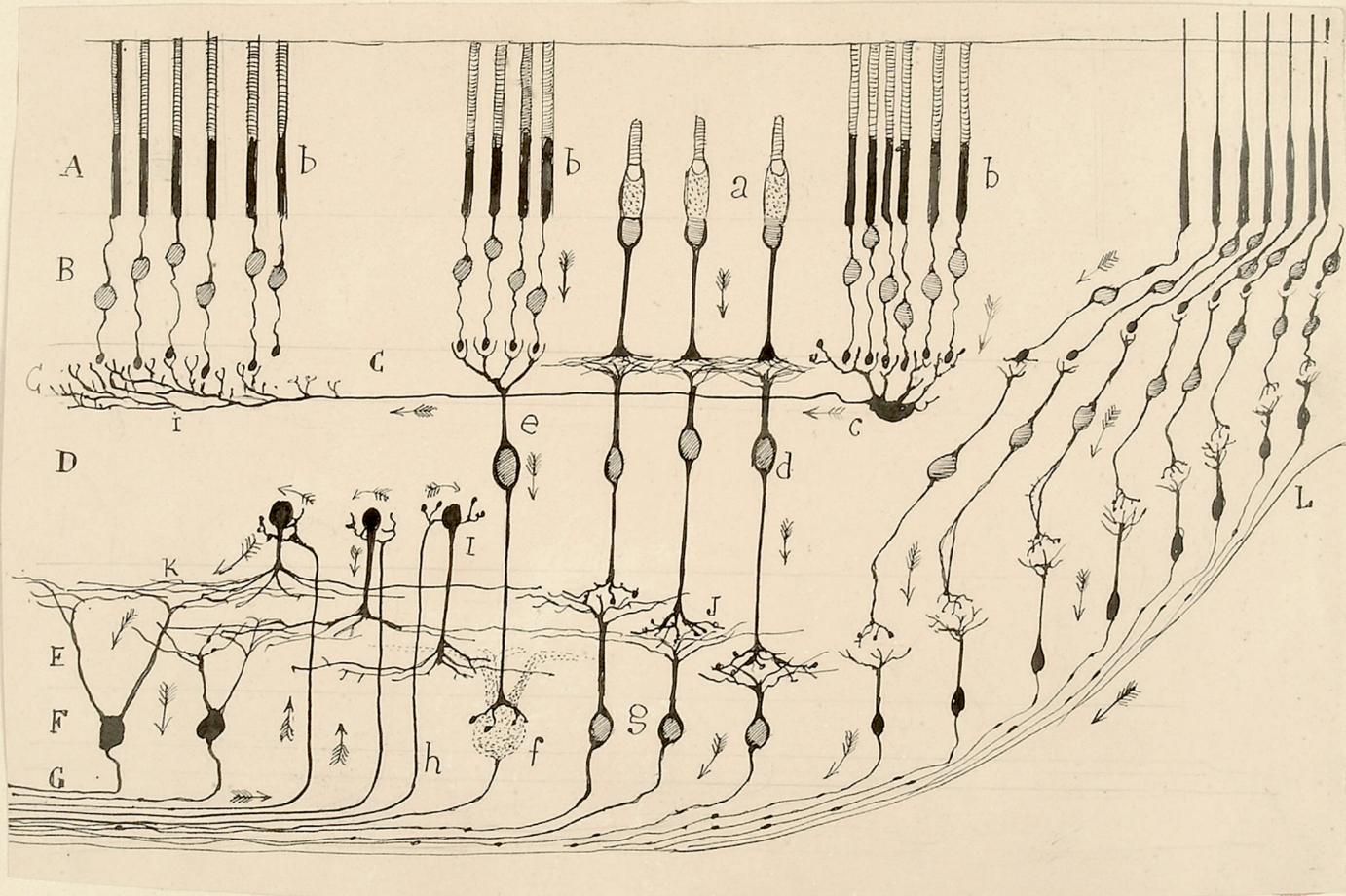
La luz puede, además, **activar reacciones químicas en determinadas moléculas**, hecho que puede ser utilizado **tanto para el diagnóstico como para el tratamiento de determinadas patologías**. Por ejemplo, en las terapias utilizadas en oncología, se inyecta un elemento fotosensible que se difunde por todos los tejidos del cuerpo y que permanece durante más tiempo en tejidos tumorales que en sanos. Esto permite diferenciar los tejidos sanos de los cancerosos y matar las células infectadas, ya que al irradiar los tejidos donde se halla el tumor, el elemento fotosensible produce la necrosis de las células tumorales.



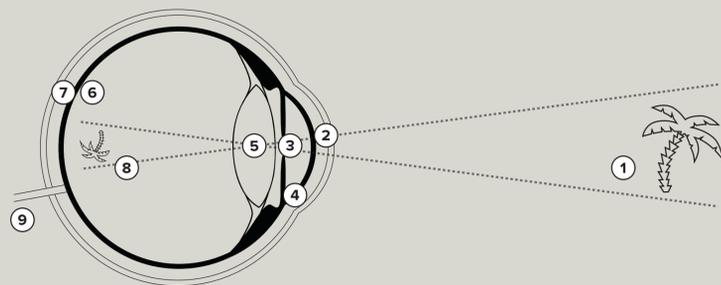
El sistema visual humano puede distinguir alrededor de diez millones de colores, gracias a las células fotosensibles de la retina, y mantener constante el color percibido bajo distintas condiciones de iluminación

↓ La retina es la capa interior del globo ocular, con una estructura compleja compuesta por diez capas diferentes de células. Fue descrita en detalle por Santiago Ramón y Cajal en el año 1900. **Imagen** Sistema de la estructura de la retina perteneciente al manuscrito *Estudio de los centros cerebrales olfatorios, ópticos y auditivos y relaciones de continuidad que con ellos tienen los nervios del mismo nombre en la especie humana y en los vertebrados*. S. Ramón y Cajal. Instituto Cajal. CSIC.

*Fig 33
Esquema de la estructura de la retina
y marcha de las corrientes (A la vuelta)*



Formación de las imágenes en el ojo



- 1 Objeto
- 2 Córnea
- 3 Pupila
- 4 Iris
- 5 Cristalino
- 6 Retina
- 7 Esclerótica
- 8 Imagen formada en la retina
- 9 Nervio óptico

10

LO QUE 'VE' NUESTRO CEREBRO

La visión es un fenómeno complejo. El sistema visual **transforma, en diferentes etapas, estímulos luminosos en información que procesa el cerebro**. En la primera fase se percibe un estímulo visual; **vemos los objetos gracias a la luz reflejada en ellos**. Este fenómeno condiciona los colores que percibimos; parte de estos colores son absorbidos por el objeto y solo los que este refleja llegan al ojo humano. La luz atraviesa los diferentes medios transparentes que componen la óptica del ojo (córnea, humor acuoso, cristalino y humor vítreo) y su imagen es proyectada sobre la retina. La retina contiene células fotosensibles (conos y bastones), que reciben los

estímulos luminosos. Después, estos se transforman en impulsos eléctricos y se transmiten hasta el cerebro a través de varias capas de neuronas interconectadas y del nervio óptico. La última etapa se desarrolla en la corteza cerebral, donde se interpretan, se reconocen y se procesan los impulsos nerviosos.

El sistema visual se adapta continuamente a cambios en el entorno (variaciones en la iluminación, color o contraste), pero también a cambios en el propio ojo (procesos de envejecimiento, patologías, tratamientos o errores refractivos), manteniendo constante nuestra **percepción visual**.



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD



CSIC



FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA



AÑO INTERNACIONAL DE LA LUZ 2015



↑ La miopía afecta en torno al 30% de la población en países occidentales y a más del 80% en algunas zonas del sudeste asiático. La Organización Mundial de la Salud la considera, junto con las cataratas y el tracoma (infección bacteriana), la mayor causa de ceguera prevenible en el mundo. **Imagen** iStock.

11

DEFECTOS DE LA VISIÓN

El ojo es un sistema óptico imperfecto. Lo normal es que la longitud del ojo se ajuste a la potencia de la córnea y el cristalino (su capacidad de hacer converger y divergir el haz de luz que les llega), de modo que la imagen se proyecte nítidamente sobre la retina. Sin embargo, si el ojo es demasiado largo, la imagen se forma antes de la retina (miopía) o, por el contrario, si el ojo es demasiado corto la imagen se forma detrás de ella (hipermetropía). En otros casos la potencia refractiva varía en unas orientaciones más que en otras (astigmatismo). **La miopía e hipermetropía se corrigen con lentes esféricas divergentes y convergentes respectivamente, que trasladan la imagen y la proyectan en la retina.** El astigmatismo, por su parte, se corrige con lentes cilíndricas que ayudan a compensar las orientaciones en las que la potencia varía. Los defectos refractivos, como la miopía, la hipermetropía y el astigmatismo,

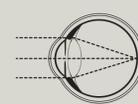
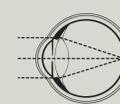
también pueden corregirse mediante cirugía refractiva ocular.

El ojo tiene otras imperfecciones que no se corrigen en la práctica clínica diaria (o con gafas), como las **aberraciones ópticas**, que provocan la degradación de la imagen retiniana o las **aberraciones cromáticas**, que suponen un desenfoque entre los extremos de la luz visible (azul y rojo).

Además de las imperfecciones ópticas, **el proceso de envejecimiento del ojo** afecta de modo significativo a la función visual. Este proceso se denomina presbicia. El cristalino pierde la capacidad de acomodación, es decir, la capacidad de enfocar en la retina las imágenes cercanas, lo que hace necesaria la utilización de gafas para visión cercana o lentes progresivas, o la corrección del problema mediante cirugía de cristalino.

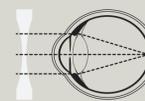


Formación de las imágenes en el ojo



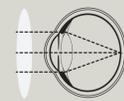
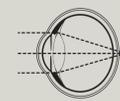
Emetropía

- Vista normal
- La imagen se forma en la retina
- No se precisa corrección



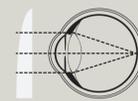
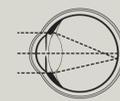
Miopía

- La imagen se forma delante de la retina
- Corrección mediante lentes divergentes



Hipermetropía

- La imagen se forma detrás de la retina
- Corrección mediante lentes convergentes



Astigmatismo

- Los rayos convergen en dos focos diferentes
- Corrección mediante lentes cilíndricas



↑ Telescopio espacial Hubble.
Imagen NASA.
→ Nebulosa de Carina vista por el telescopio espacial Hubble
Imagen NASA, ESA, Hubble SM1 ERO Team.

12

DONDE EL OJO NO LLEGA: TELESCOPIOS Y MICROSCOPIOS

El ojo humano se comporta como un instrumento óptico que proporciona sobre la retina una imagen de los objetos que se colocan frente a él. Sin embargo, tiene unas limitaciones que le impiden observar lo muy pequeño o lo muy lejano. Para ello tenemos instrumentos ópticos que nos ayudan a conseguirlo.

Los telescopios permiten observar objetos lejanos. Existen diversos diseños que utilizan lentes, espejos o una combinación de ambos. Antiguamente los astrónomos solo podían observar el firmamento a través del ocular del telescopio, pero en la actualidad los telescopios más sofisticados están preparados para formar imágenes sobre detectores de muy alta resolución y sensibilidad. Estos detectores permiten analizar el

espectro de la luz y así conocer la composición química de los objetos que observan. Los sistemas de telescopios más modernos y precisos utilizan **espejos compuestos por otros espejos** que pueden moverse ligeramente para compensar el efecto de las turbulencias atmosféricas.

El microscopio es un instrumento óptico mediante el que podemos observar objetos muy pequeños. Se fabrica utilizando lentes de gran calidad que permiten obtener imágenes claras y bien contrastadas. Los mayores avances en la microscopía óptica han venido ligados al uso de elementos auxiliares en los sistemas de observación y de iluminación para poder ver objetos transparentes o de tamaño nanométrico, o incluso para la medida muy precisa del **relieve de los objetos**.



↑ Microscopio óptico. **Imagen** Gema de Asunción. Centro de Química Orgánica 'Lora-Tamayo', CSIC.
→ Citología broncoalveolar vista por un microscopio óptico. **Imagen** Certamen nacional de fotografía científica Fotciencia09. Etérea celularidad. María Teresa Corcuera.



El filamento de una bombilla está hecho de un hilo de wolframio muy largo y fino. En una típica bombilla de sesenta vatios, el filamento es de aproximadamente dos metros de largo

← Tormenta eléctrica en Wagga (Australia).
Imagen Bidgee. Wikimedia Commons.

13

LA CONQUISTA DE LA OSCURIDAD

Un relámpago y un tubo fluorescente comparten el mismo mecanismo físico de emisión de luz: una descarga eléctrica desprende los electrones de los átomos y cuando los átomos recuperan de nuevo sus electrones, se emite energía en forma de luz.

Gracias a la tecnología, hemos logrado encerrar un objeto incandescente para dar luz, e incluso ‘domesticar’ la luz de una tormenta para iluminar nuestras vidas y actividades.

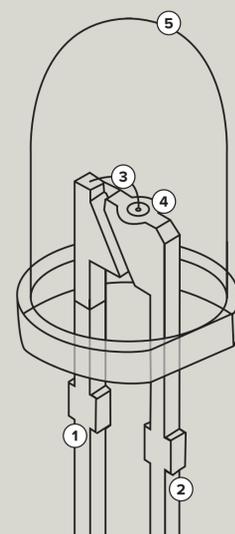
En las últimas décadas hemos asistido a una revolución en el ámbito de la iluminación. Los nuevos **dispositivos emisores LED** (Light Emitting Diode) proporcionan luz gracias a la interacción de una corriente eléctrica con la estructura energética de ciertos materiales que se denominan semiconductores. Este mecanismo permite desarrollar nuevas lámparas y fabricar fuentes láser más compactas y eficientes.



El dispositivo LED

→ En los dispositivos emisores de luz LED, una corriente eléctrica pasa a través de la unión entre dos materiales semiconductores. En esta unión las cargas eléctricas que circulan por el material pueden recombinarse para dar lugar a los fotones que forman la luz.

- 1 Ánodo
- 2 Cátodo
- 3 Elemento emisor semiconductor
- 4 Cavidad reflectora
- 5 Lente o encapsulado plástico

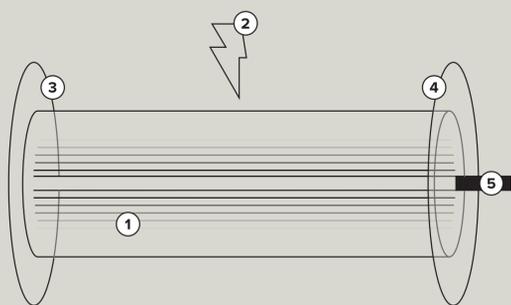




↑ Imagen Red Lego laser lens. Martin Kenny. Flickr.



Estructura típica de un láser



↑ Para que un láser funcione precisa una cavidad en la que se encuentra un medio activo (sólido, líquido o gaseoso). Este medio es el encargado de amplificar la luz gracias a un aporte de energía y un sistema de retroalimentación, como por ejemplo un sistema de espejos.

- ① Medio activo para la formación del láser
- ② Energía bombeada para el láser
- ③ Espejo altamente reflectante (casi al 100%)
- ④ Espejo menos reflectante
- ⑤ Emisión del rayo láser



Característica emisión coherente y monocromática del láser frente a otras fuentes de luz

Luz solar colores diferentes.



LED monocromático (un único color) y ondas en desfase (no coherentes).



Láser monocromático y ondas en fase que oscilan al unísono (coherentes).



14

EL LÁSER

El láser es fundamental en el mundo de las telecomunicaciones, la industria, la medicina y la investigación, así como en infinidad de usos diarios. No obstante, cuando el físico Theodore Maiman trató de publicar sus primeros resultados acerca del láser en 1960, su artículo fue rechazado y el láser calificado como «una solución en busca de un problema».

Láser es un acrónimo de la expresión inglesa **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**, que puede traducirse como «amplificación de luz por emisión estimulada de radiación».

Un láser se diferencia de otras fuentes de luz porque **emite de forma coherente y monocromática**. Es coherente porque las ondas de luz emitidas oscilan al unísono, de manera que los campos electromagnéticos de las ondas asociadas a cada uno de sus fotones se superponen. Esto permite que un haz de luz láser se enfoque en **zonas muy pequeñas**, consiguiendo grandes concentraciones de energía, y también que este haz permanezca **estrecho a distancias muy largas**. Por otro lado, es monocromática porque el color de la luz de un láser es muy puro, ocupando una banda muy estrecha dentro del espectro electromagnético.



La capacidad de todas las líneas de comunicación transoceánicas ya instaladas es de más de 16 terabytes por segundo, el equivalente al contenido de 430 DVD o 20 kilómetros de estanterías de libros. La próxima generación permitirá transmitir señales a más de 100 terabytes por segundo a enormes distancias por una única fibra

→ Se estima que existen aproximadamente 1.500 millones de kilómetros de fibra instalados a lo largo y ancho del globo, lo que supone unas 3.900 veces la distancia de la Tierra a la Luna, o cerca de 37.500 vueltas al mundo. **Ilustración** Raúl Gómez Estudio.

 Líneas de comunicación transoceánica a través de fibra óptica.

15

UN MUNDO CONECTADO POR FIBRA ÓPTICA

Las fibras ópticas modernas, que tienen un **tamaño comparable al de un cabello humano**, permiten confinar la luz y transmitirla a distancias muy largas, con pérdidas de intensidad menores de un 5% por cada kilómetro recorrido. Sin fibras ópticas para transportar las señales de luz, el láser para generarlas y los detectores para incorporarlas a los sistemas electrónicos, no existirían las modernas redes de comunicación que conocemos.

Una red de comunicación a través de fibra óptica es un sistema extraordinariamente complejo, con multitud de componentes optoelectrónicos que permiten transmitir señales entre un emisor y un receptor situados en dos puntos cualesquiera

de la red. La espina dorsal de estas complejas redes la componen líneas de gran capacidad y larga distancia, que transportan el grueso de la información a **distancias de miles de kilómetros**. Estos enlaces pueden ser subterráneos o submarinos, y conectan a menudo nodos en diferentes continentes.

La luz que se suele utilizar en telecomunicaciones es infrarroja, y por tanto invisible para el ojo humano. **Las fibras ópticas transmiten información codificada en forma de pulsos de luz láser**. Una vez la señal de luz alcanza al receptor, esta debe convertirse en una señal eléctrica y decodificarse.



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD



CSIC

FECYT

FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

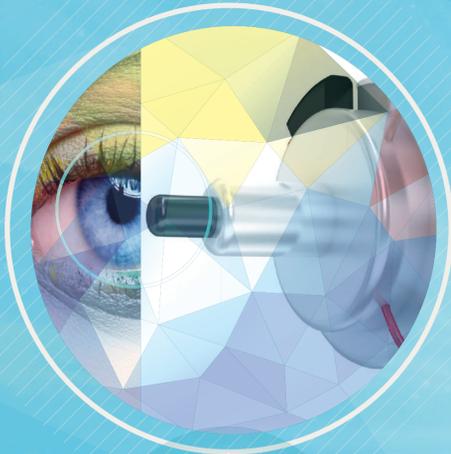


AÑO INTERNACIONAL DE LA LUZ 2015



Un único pulso láser de una duración suficientemente corta es capaz de elevar localmente la temperatura más de mil grados

→ Ilustración Raúl Gómez Estudio.



MEDICINA

- > Cirugía refractiva
- > Operaciones y tratamientos quirúrgicos
- > Tallado de piezas dentales



INDUSTRIA

- > Corte o soldadura de objetos metálicos
- > Mecanizado de materiales especiales
- > Ignición en bujías de automóviles

APLICACIONES DEL

Láser



ARQUITECTURA / ARTE

- > Elaboración de elementos decorativos
- > Limpieza de objetos de arte o fachadas



ESTÉTICA

- > Depilación
- > Celulitis
- > Estrías
- > Rejuvenecimiento de la piel
- > Tratamientos de acné

16

EL PODER DE TRANSFORMACIÓN DEL LÁSER

Al impactar la luz de un láser con un objeto, la energía electromagnética acaba transformándose principalmente en energía térmica, lo que hace que su temperatura se eleve localmente. **El efecto del láser está muy localizado alrededor del punto de impacto** y cuanto menor es la duración de la exposición, más localizada está la zona afectada.

Al ser una **fente de energía concentrada que se puede dirigir y controlar de forma remota (a**

distancia), se ha convertido en una herramienta de uso extendido en diversos procesos de interés industrial, en tratamientos estéticos, odontológicos o en cirugía refractiva.



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD



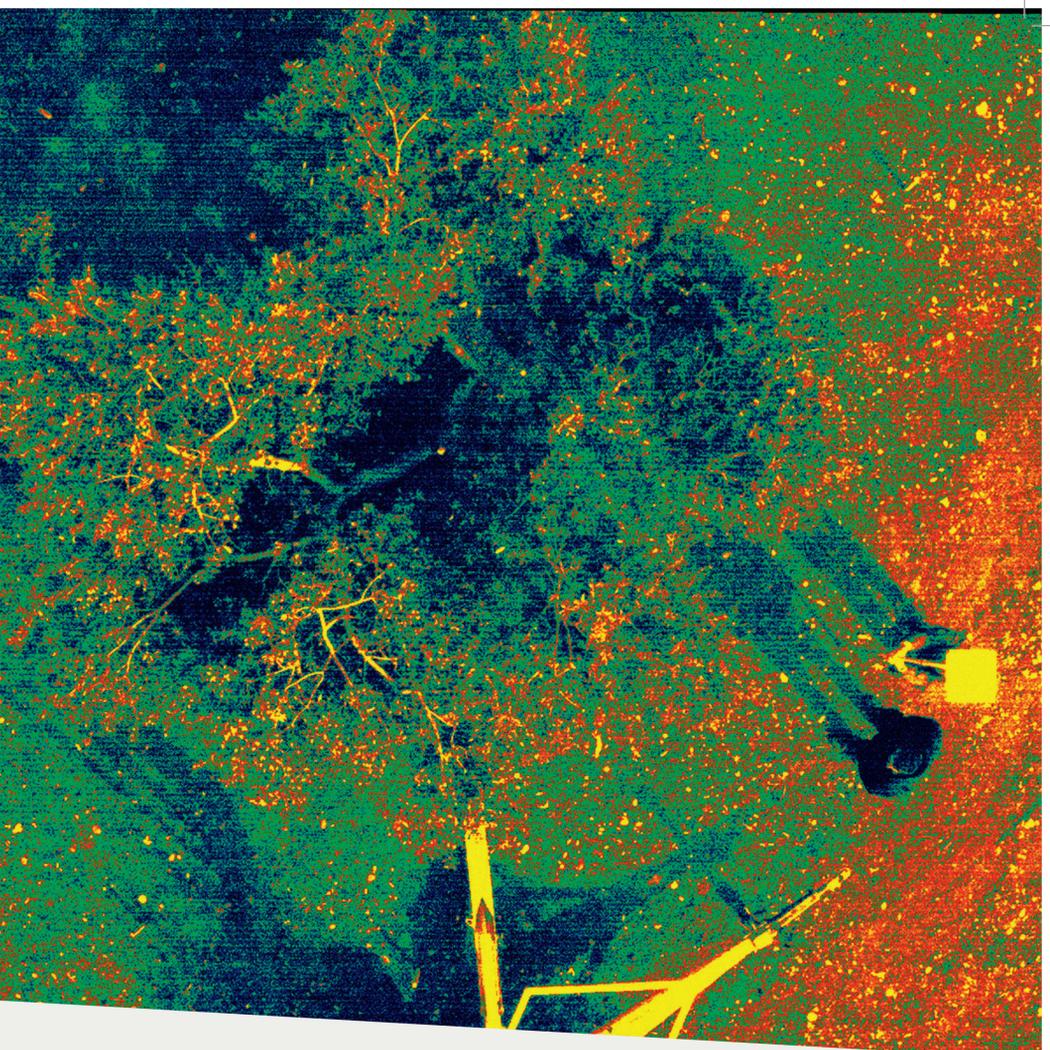
CSIC



FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA



AÑO INTERNACIONAL DE LA LUZ 2015



17

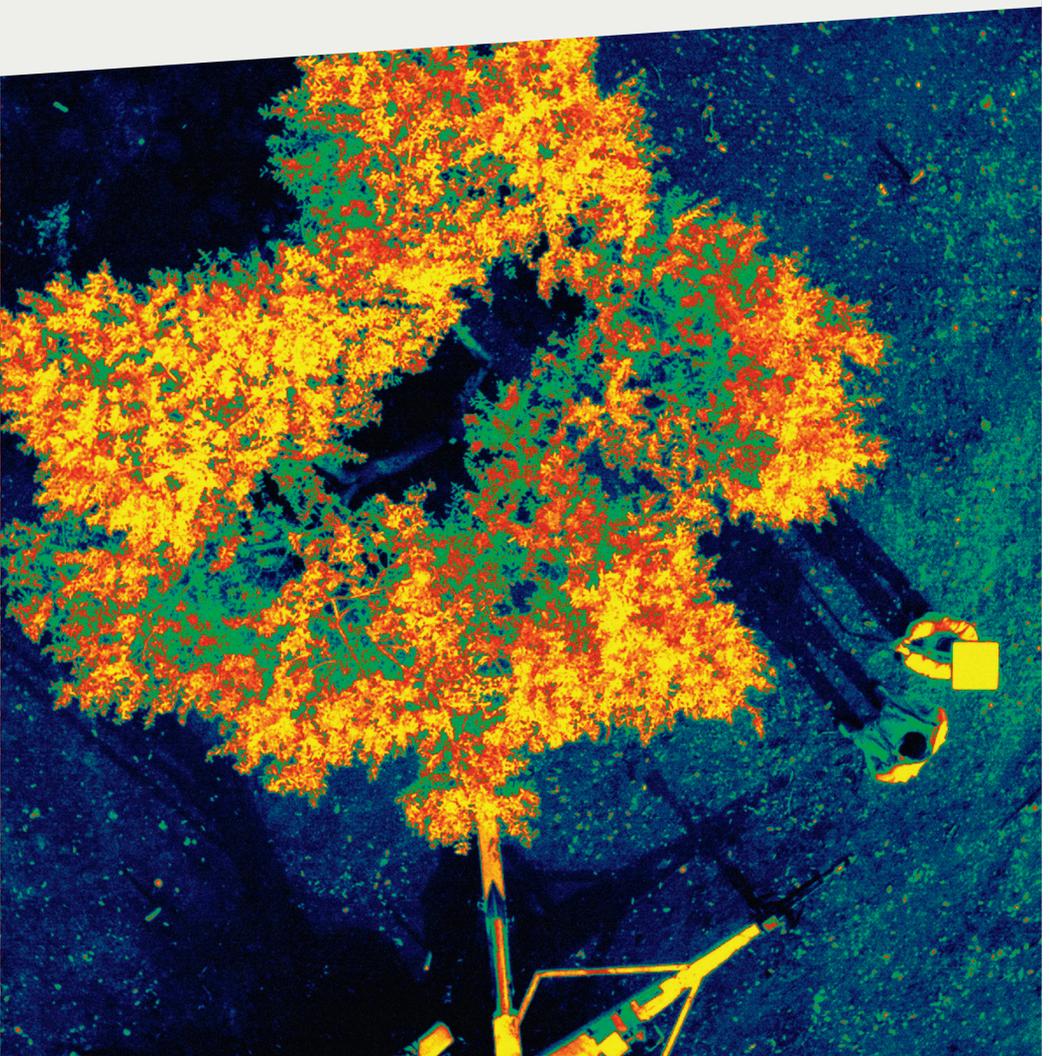
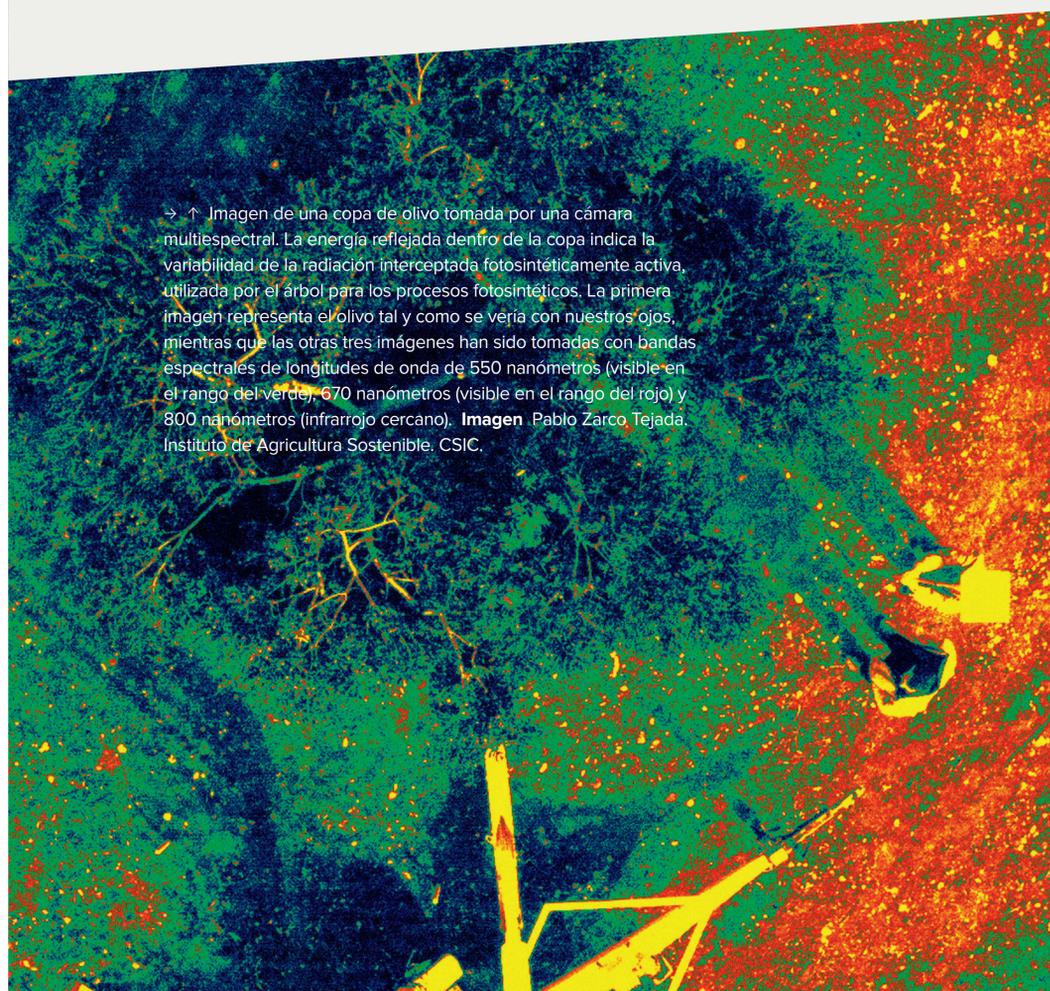
ESPECTROSCOPÍA: LAS 'HUELLAS DACTILARES' DE LOS OBJETOS

La espectroscopía infrarroja es sin duda la técnica espectral más empleada en ambientes industriales para analizar una muestra (sólida, líquida o gaseosa) con escasa o nula manipulación. En ella, la luz infrarroja excita las moléculas de la muestra y las hace vibrar. Como resultado, la muestra absorbe ciertas longitudes de onda de la luz que son específicas de esas moléculas. **El espectro resultante, denominado espectro molecular, es la forma que tienen las moléculas de hablarnos, de decirnos quiénes son y cuál es su estructura.**

La espectroscopía tiene un impacto significativo en las industrias farmacéutica, alimentaria, agrícola, forestal, química o metalúrgica. Sin embargo, la

gran revolución llega de la mano de las técnicas de imagen y la posibilidad de utilizar satélites o aviones, tomando como inspiración las técnicas utilizadas durante años por los astrónomos para analizar objetos extraterrestres. **La imagen espectral equivale a una imagen tomada con un filtro de color que se selecciona de acuerdo con el problema que se quiere diagnosticar.** Nos informa de la abundancia, composición y características del objeto analizado, así como de múltiples aspectos físicos, como la densidad o la presión. Hay muchos ejemplos de su utilización no solo como diagnóstico en medicina o en ingeniería, sino también en la gestión de recursos naturales o explotaciones agrícolas.

→ ↑ Imagen de una copa de olivo tomada por una cámara multiespectral. La energía reflejada dentro de la copa indica la variabilidad de la radiación interceptada fotosintéticamente activa, utilizada por el árbol para los procesos fotosintéticos. La primera imagen representa el olivo tal y como se vería con nuestros ojos, mientras que las otras tres imágenes han sido tomadas con bandas espectrales de longitudes de onda de 550 nanómetros (visible en el rango del verde), 670 nanómetros (visible en el rango del rojo) y 800 nanómetros (infrarrojo cercano). **Imagen** Pablo Zarco Tejada, Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC.



↓ Torres solares localizadas en Sanlúcar la Mayor, Sevilla, pertenecientes a Abengoa. La torre iluminada se llama PS10 y fue la primera construida con fines comerciales en el mundo. **Imagen** Torres en Sanlúcar la Mayor (Sevilla). Abengoa.



18

TECNOLOGÍA SOLAR-TÉRMICA

La luz solar puede ser utilizada para producir electricidad a partir de energía térmica en una planta termosolar con tecnología de torre. **La energía solar-térmica se presenta como una energía limpia y gestionable**, es decir, capaz de adaptar su producción a la demanda gracias, principalmente, a su enorme potencial de reducción de costes y su alto grado de eficiencia.

España, con 2.300 megavatios instalados de energía solar térmica, presenta unas condiciones ideales, por nivel de recursos solares y de desarrollo, para que se localice una central solar térmica.

En los campos solares que rodean las torres, **se recolecta la luz mediante helióstatos (espejos**

que se orientan en función de la posición del Sol), con una superficie de 120 metros cuadrados cada uno. Esta luz solar es reflejada en un receptor situado en la torre, donde se transfiere la energía térmica para poder generar vapor. Este vapor mueve una turbina en la base de la torre que, finalmente, produce electricidad a través de un generador.

Un ejemplo de la producción de electricidad con tecnología de torre lo constituyen las plantas PS10 (11 MWe) y PS20 (20 MWe), en Sevilla, capaces de suministrar electricidad a más de 10.000 hogares, reduciendo al mismo tiempo la emisión, al año, de más de 13 toneladas de CO₂ a la atmósfera.



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD



CSIC



FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA



AÑO INTERNACIONAL DE LA LUZ 2015



Aún no ha amanecido y Lucía recurre a la iluminación artificial.



Mientras desayuna, revisa su móvil y consulta el pronóstico del tiempo gracias a los satélites meteorológicos.



Lucía se pone sus gafas y se mira al espejo, que refleja 'perfectamente' su imagen.



Un detector óptico impide que la puerta del ascensor se cierre mientras sale con su bici.



Lucía circula con seguridad gracias a que el tráfico está regulado por semáforos, cámaras, pintura reflectante en las calzadas, etc.



En su trabajo, la información del mundo exterior le llega mediante un enlace de fibra óptica. Sus CD y DVD están grabados y se leen gracias a la tecnología láser.

19

DÍAS LLENOS DE LUZ

Más allá de lo evidente, en nuestro día a día hay gran cantidad de actividades que no podríamos realizar sin la luz y la óptica ni sin sus aplicaciones tecnológicas. Lucía nos cuenta algunos ejemplos a través de un cómic que relata un día cualquiera en su vida. Podremos así comprobar que los días están siempre llenos de luz.

→ Ilustración Emma Gascó.



Gran parte de las verduras y hortalizas que consume han sido recolectadas en fincas controladas mediante técnicas hiperspectrales desde satélites espaciales.



El cajero registra los códigos de barras de su compra mediante un lector láser y comprobará la autenticidad de su billete observando el holograma y la iridiscencia de los números.



Deja poco a poco de llover y Lucía observa el arcoíris. La luz del Sol se refracta y refleja en las gotas de agua mostrando el espectro de la luz visible.



En el cine en 3D, las gafas polarizadoras dan a la película un gran realismo. El proyector digital, con una fuente láser, proporciona escenas muy luminosas y nítidas.



Llega a casa. Es el momento de encender las luces.



Los niveles de melatonina de su organismo suben y le ayudan a conciliar el sueño. Apaga las luces y cierra los ojos. Mañana será otro día lleno de luz.



→ La pintura poco determinada por el dibujo expresa mejor la luz de los colores, tal y como lo hizo Turner en su obra *Fighting Temeraire* y más adelante también realizaron los impresionistas Monet o Sorolla. **Imagen** *Fighting Temeraire* (1838), William Turner. National Gallery, Londres.

20

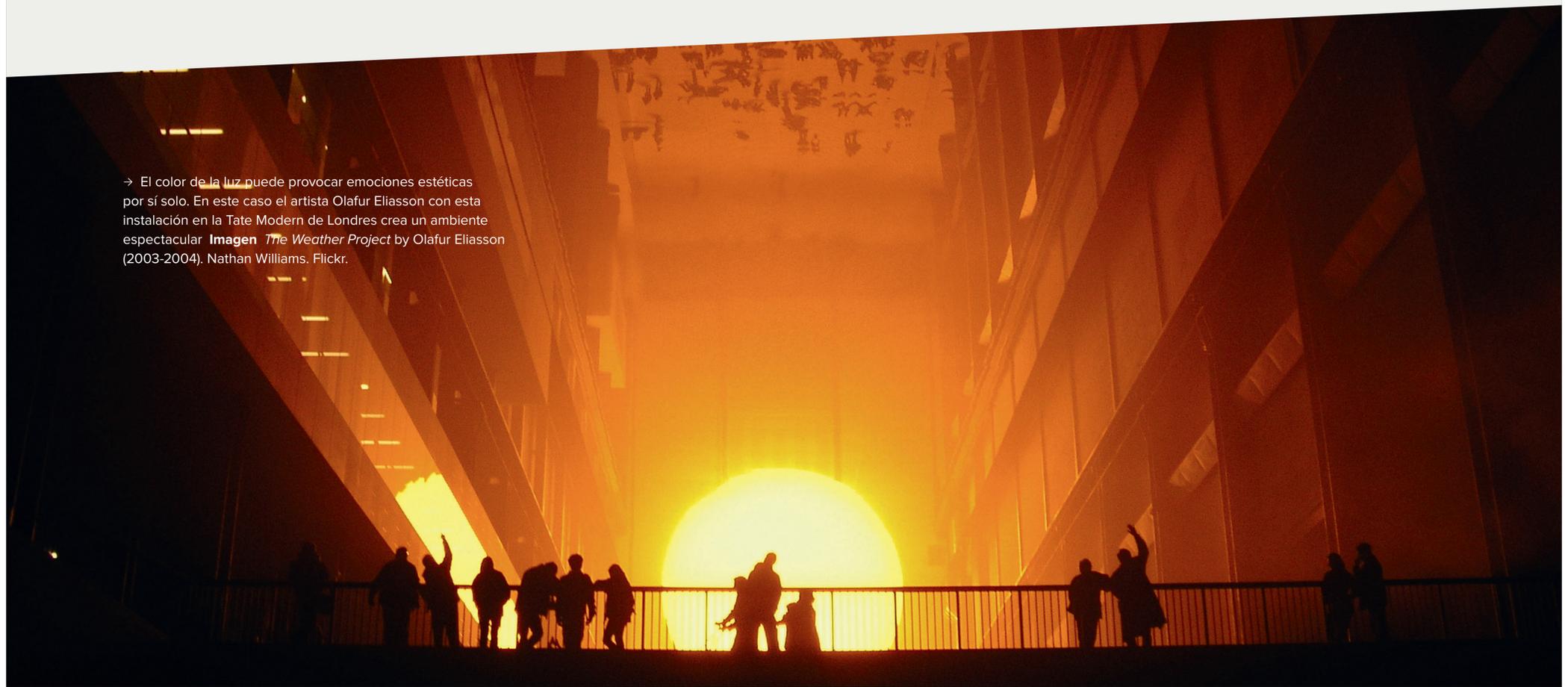
PINTAR LA LUZ

Desde la Antigüedad los artistas han plasmado **imágenes con significado simbólico** o representativo utilizando pigmentos. Cuando han querido representar la naturaleza, han tomado como modelo la realidad que les proporcionaba su vista (esos rayos visuales que se proyectan desde los objetos hacia el ojo).

Se fue pasando de representar lo que en arte se conoce como ‘colores locales’ de los objetos (sus colores reales o propios), como en el Renacimiento, a dar un mayor protagonismo a la luz. En el siglo XIX los pintores, cada vez más atentos a la **percepción sensorial**, pero sobre todo influidos por las **nuevas teorías de la descomposición de la luz**, lograron efectos tan deslumbrantes como los que apreciamos en el Impresionismo.

Con la llegada de la **fotografía**, la pintura dejó de ser exclusivamente una representación de la naturaleza tal y como la vemos para interpretarla con más libertad. Al mismo tiempo, expresando solo colores y formas, el arte experimentó un rápido recorrido que culminó en el arte abstracto del siglo XX.

Desde entonces, cuando los artistas han querido continuar plasmando imágenes representativas han recurrido a las **nuevas tecnologías que registran (o graban) las imágenes que proyecta la luz**, al servicio de la pintura, la fotografía y otras disciplinas artísticas. Además, con frecuencia la luz es utilizada de forma prácticamente abstracta en una gran variedad de **instalaciones y ambientes envolventes**.



→ El color de la luz puede provocar emociones estéticas por sí solo. En este caso el artista Olafur Eliasson con esta instalación en la Tate Modern de Londres crea un ambiente espectacular. **Imagen** *The Weather Project* by Olafur Eliasson (2003-2004). Nathan Williams. Flickr.



GOBIERNO DE ESPAÑA

MINISTERIO DE ECONOMÍA Y COMPETITIVIDAD



CSIC



FUNDACIÓN ESPAÑOLA PARA LA CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA



AÑO INTERNACIONAL DE LA LUZ 2015