



Luz Verde

Miradas y enfoques sobre la luz

LuzVerde

Miradas y enfoques sobre la luz



**Facultad de
Ciencias Exactas**



**UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA**

Bergero, Paula

Luz verde : miradas y enfoques sobre la Luz / Paula Bergero ; contribuciones de Cecilia Von Reichenbach ; Florencia Cabana ; compilado por Paula Bergero ; coordinación general de Daniel R. Sergnese. - 1a ed ilustrada. - La Plata : Del Instituto IFLP, 2015.

124 p. ; 21 x 15 cm.

ISBN 978-987-24485-7-8

1. Ciencias Físicas. 2. Ciencia y Tecnología. I. Von Reichenbach, Cecilia, colab. II. Cabana, Florencia, colab. III. Bergero, Paula, comp. IV. Sergnese, Daniel R., coord. V. Título.

CDD 535

1era edición

Tirada: 1000 ejemplares

ISBN 978-987-24485-7-8

© 2015

Edita: Instituto de Física La Plata (IFLP, CONICET - UNLP)

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

49 y 115, La Plata (1900), Buenos Aires, Argentina.

Edición especial del Museo de Física / UNLP, en el Año Internacional de la Luz.

Queda hecho el depósito que establece la ley 11.723

Libro de edición Argentina

No se permite la reproducción parcial o total, el almacenamiento, el alquiler, la transmisión o la transformación de este libro, en cualquier forma o por cualquier medio, sea electrónico o mecánico, mediante fotocopias, digitalización u otros métodos, sin el permiso previo y escrito del editor. Su infracción está penada por las leyes 11.723 y 25.446.-

Ilustración de tapa: Lucía Guala

Coordinación editorial: Daniel Sergnese

Diseño: Casiana Rodríguez Negri

*“Luz, luz, luz del alma,
soy un hombre que espera el alba.”*

**Fragmento de la letra de la canción Par Mil de “Divididos”.
Par Mil se refiere a ciertos reflectores de 1000 watts (2000)**

Índice

Prólogo	11
Introducción	15
Agradecimientos	18
Las autoras	19
Capítulo 1 ¡Qué fenómeno la luz!	21
Primeros resplandores: la luz en la antigüedad	22
El quinto elemento	24
Intromisión	25
La alteración de los medios oscuros	26
<i>El aprendizaje de la luz: Ideas infantiles (y no tanto)</i> <i>Por Diego Petrucci</i>	27
Y sigue resplandeciendo: la luz en la modernidad	30
Newton, el señor de los anillos	30
Luz + luz = oscuridad	31
Perturbaciones viajeras	32
No todo es relativo	32
Capítulo 2 Desfile de modelos: la mirada de la Física	35
¡Rayos!	37
Idas y vueltas de la luz: Reflexión	37
Espejito, espejito	38
Luz que se transmite: Refracción	39
Lentes	41
<i>Historia de las lentes</i> <i>Por Andrés Dragowski</i>	41

Rayos en el ojo	46
Positivas y negativas	47
Defectos refractivos en Argentina	48
Pedacitos de luz: Modelo de partícula	51
Una idea Nobel: Efecto fotoeléctrico	53
<i>El merengue del fotón</i>	55
<i>Por Damián Gulich</i>	
¿Qué onda?	57
Ondas en un resorte	59
Ondas electromagnéticas	60
Transparencias	65
Sumas y restas: Luz que interfiere	70
Por aquí y por allá: Difracción	72
Luz que se orienta: Polarización	75
¿En qué quedamos: onda o partícula?	78
Capítulo 3 Percepción	81
La visión	81
<i>La luz en el arte. Un ejemplo: el arte cinético</i>	82
<i>Por Federica Rampf</i>	
<i>El ojo, el arte, la luz. La obra de Le Parc</i>	83
<i>Por Marcela Andruchow</i>	
Tercera dimensión	85
No todo es lo que parece	87
Espectro de luz	88
El color es un invento del cerebro	92
Blanco y negro	94
Color por reflexión	95

Color por transmisión	96
Colores estructurales	97
El color en la cultura	98
El color del cielo, del mar y del sol	99
<i>¿Por qué el cielo es azul?</i>	99
<i>Adaptación del artículo de David Jou y Marià Baig (1993)</i>	
<i>El color del mar</i>	100
<i>Por Cecilia von Reichenbach, (2009)</i>	
<i>El color del Sol</i>	100
<i>Por Guillermo Abramson (2012) (adaptación)</i>	
Láser	102
Capítulo 4 Historias recientes y no tanto	105
<i>La supuesta detección de velocidades superlumínicas de los neutrinos.</i>	107
<i>Por Gastón E. Giribet</i>	
Rayos catódicos y materia radiante	109
<i>Adaptación del artículo “Experimentos con rayos que hicieron historia”</i>	109
<i>Por Paula Bergero (2008)</i>	
Controversias	111
Consecuencias de los experimentos de Crookes: Rayos X	111
Radiactividad	113
El electrón	113
<i>La luz es ciencia y tecnología</i>	114
<i>Por Alberto Lencina</i>	
Epílogo	119
Referencias	121
Bibliografía de consulta	123

Prólogo

De las cuatro interacciones fundamentales, la electromagnética es la que mayor relevancia presenta en nuestra vida cotidiana (siempre que tomemos las mínimas precauciones que la gravedad demanda: no salir de nuestro departamento del quinto piso por la ventana). Y el destilado más refinado de esta interacción, que dota de sentido y posibilidades a nuestra existencia, es la luz. No sólo la luz visible, la de la magnífica paleta del arcoíris, sino también aquella que porta consigo la calidez de nuestra estrella más cercana y el germen azaroso de la evolución de las especies. La luz solar es convertida por las plantas en azúcares que son el combustible de la vida. Comprender qué es la luz ha demandado una buena parte de la historia del pensamiento científico y la mejor tradición de la pintura —especialmente durante el impresionismo—, de la fotografía y del cine. «Luz verde: Miradas y enfoques sobre la luz» respira la frescura del entusiasmo que Paula Bergero, Cecilia von Reichenbach y Florencia Cabana vuelcan a diario en el Museo de Física de La Plata. En cada una de sus explicaciones se percibe el deseo de que el lector disfrute tanto como lo hacen ellas, y por eso acompañan el texto con extractos de poemas y canciones que aluden directa o tangencialmente a aquello que se está tratando. La sucesión de textos y párrafos se asemejan a la colorida composición de un cuadro de Kandinsky. Parecen querer celebrar así la misteriosa magia del color, que comienza en la feliz coincidencia del espectro visible con el máximo de emisión en la radiación solar. Como si nuestros ojos se hubieran adaptado a la temperatura superficial de una estrella que está a 150 millones de kilómetros o tuviéramos, en definitiva, la inmensa fortuna de vivir aquí y ahora.

La búsqueda de una explicación para el fenómeno de la luz ha convocado a lo más granado de la historia de la física, desde Isaac Newton hasta Albert Einstein, pasando por James Clerk Maxwell. Inicialmente pensada como un torrente de corpúsculos, más adelante como una onda, nuevamente como corpúsculos para llegar, en pleno siglo XX, a la conclusión de que puede ser ambas cosas a la vez y que incluso, a energías más altas, la luz empieza a confundirse con interacciones que ocurren en el interior del núcleo atómico y que, paradójicamente, son la base del brillo del Sol. Círculos que se cierran como los anillos de Newton bajo la curvatura de una lente o los anillos de Einstein, esas colosales imágenes que resultan de la comunión del electromagnetismo y la Teoría de la Relatividad General.

«Vengo de los fuegos empíreos/desde espacios microscópicos/donde las moléculas con feroces deseos/tiemblan en abrazos ardientes./Los átomos chocan, los espectros resplandecen [...]», escribió Maxwell en un poema dedicado a Peter Tait, uno de los padres de la termodinámica. El escocés concibió el concepto de campo que había intuido Michael Faraday, pero no se permitió apostar por él como algo fundamental y nuevo. Siempre quiso verlo con los anteojos de la época, engeguado por la mecánica de Newton. Por ello apostó por la existencia del éter, como todos sus contemporáneos y tuvo que ser Einstein quien pulverizara esta posibilidad poniendo de relieve el status singular y elegante del concepto de campo y decretando el carácter universal de la velocidad de la luz en el vacío. Toda la física moderna descansa en estas ideas.

Es fascinante también la historia de los intentos que el ser humano ha realizado por domesticar a la luz, produciéndola a su antojo ante la retirada diaria del Sol. A través del fuego en los albores de la civilización o, algunos milenios más tarde, mediante la lámpara incandescente. Hasta llegar al desarrollo de los sofisticados láseres y leds, cuya ciencia y tecnología constituyen el mascarón de proa de la investigación de vanguardia desde hace varias décadas. La fascinante naturaleza de la luz hace que se la pueda considerar de forma distinta según las circunstancias. Desde el fino trazo euclídeo de la óptica geométrica a la incorpórea ola que da lugar al fenómeno de la interferencia, ése que las autoras sintetizan en la forma de una ecuación inquietante: luz + luz = oscuridad.

Es la luz la única portadora de información que tenemos sobre el Universo temprano a través de lo que se conoce como la radiación cósmica de fondo. El satélite europeo Planck ha sido capaz de estudiar esa luminosidad

primigenia con tanto detalle como para determinar diferencias de temperatura de una diez milésima de grado entre dos puntos cualesquiera del cosmos más antiguo. Y gracias a ello tenemos un conocimiento bastante satisfactorio de lo que ocurrió en la infancia del Universo visible. Esta última palabra no es gratuita: el Universo puede ser infinito, pero nada sabemos —ni probablemente sabremos jamás— de aquella parte que no comparte con nosotros su luz. El primero en intuir algunas de estas ideas y dejar constancia de ello fue un escritor nacido en Boston: Edgar Allan Poe.

Esta maravillosa saga científica tiene su correlato en la exploración de la luz desde la otra cara de la curiosidad indagadora del ser humano: el arte. Y «Luz verde», lejos de dejar de lado esto, lo celebra profusamente a lo largo de sus páginas. La pintura es una forma de reproducir con colores en una superficie plana la plétórica expresión lumínica de una escena que también tiene profundidad. La fotografía ha vivido sus mejores horas en la búsqueda de todas las formas posibles de capturar la luz. De devolver su textura y sus matices. El cine ha logrado el prodigio de empaquetar luz en movimiento y devolverla en lugares y momentos distintos. Las obras cumbre de la historia del cine no son otra cosa, en definitiva, que la reproducción de una combinación única y entrañable de luz y sonido.

Una reflexión aparte merece la luz que está afuera del espectro visible. Es mediante ella que se transmiten la radio, la televisión, las señales de los satélites que permiten el funcionamiento de internet o el GPS. A través de ella calentamos los alimentos, podemos ver una fractura sin necesidad de abrir al paciente y sabemos mucho más del Universo que aquello que nos dejan ver nuestros ojos. Las imágenes de estrellas y galaxias en longitudes de onda que están fuera del espectro visible nos permiten observar en detalle procesos físicos esenciales que, como anticipó un entrañable personaje de Antoine de Saint-Exupéry, son invisibles a los ojos.

Si en las líneas de este prólogo laten, contenidas, las múltiples facetas de un preciado diamante, es en los párrafos que vienen a continuación, en este encomiable esfuerzo colectivo que es «Luz verde», donde el lector podrá regocijarse con el esplendor de su refulgente brillo.

José Edelstein

Buenos Aires, 13 de octubre de 2015

Introducción

Luz Verde es un texto sobre la luz. Está escrito para un lector curioso pero no especializado, y también para docentes que buscan motivar a sus estudiantes en el aprendizaje de la física. Surgió del trabajo en educación que se lleva adelante en el Museo de Física del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de La Plata, UNLP. El 2015 fue declarado por la Asamblea General de las Naciones Unidas como Año mundial de la luz y las tecnologías asociadas, con el objetivo de conocer más profundamente este maravilloso fenómeno y concientizarnos sobre su impacto en nuestra vida cotidiana y en la cultura. Con este libro el Museo de Física de la Facultad de Ciencias Exactas de la UNLP se suma a las celebraciones.

Los contenidos de óptica aparecen en este libro abordados desde una perspectiva cultural, histórica y fenomenológica, y están acompañados de producciones artísticas que hemos considerado de alguna manera relacionadas con la luz. También ofrecemos aquí información sobre algunas investigaciones en esta disciplina que se realizan en nuestro país. Luz Verde cuenta también con un material digital en Internet, donde pueden encontrarse ilustraciones, fotografías y actividades propuestas y un repertorio de instrucciones detalladas para la construcción de varios instrumentos demostrativos. Dichos dispositivos pueden ser fabricados con objetos de fácil acceso y de bajo costo, resultando de sencillo armado y puesta en marcha. En algunos casos se incluyen links a las obras literarias completas y a las canciones que han sido mencionadas.

Este libro aborda la luz desde distintas concepciones siendo una de éstas la de modelo, concepto utilizado en diversos contextos con variados sig-

nificados. Aquí lo entenderemos como una representación simplificada y parcial del objeto de estudio (en este caso la luz), en la cual se consideran algunas de sus características originales, que resultan relevantes para la descripción de los fenómenos considerados. Plantearemos entonces las descripciones y análisis de los fenómenos tratados aquí desde los modelos complementarios de la luz como rayo, partícula y onda. Estos modelos son complementarios ya que no son modelos superadores e inclusivos; no puede tratarse todo el repertorio de fenómenos relacionados con la luz a partir de un único paradigma. En el Museo de Física, el modelo de onda suele ser el elegido para la presentación de gran parte de los contenidos de óptica. Consideramos que partir de las propiedades generales de las ondas tiene la ventaja de permitirnos un abordaje gradual y fenomenológico. Así, conceptos y fenómenos como reflexión, transmisión, cambio de medio, velocidad de propagación, etc., pueden ser mostrados con dispositivos mecánicos para luego ser extendidos al caso de la luz. En este proceso se tratan cuidadosamente las analogías para no conducir a ideas erróneas, como por ejemplo, la necesidad de un medio material para la propagación de la luz. El desarrollo de los contenidos de óptica a partir del modelo ondulatorio puede encontrarse en el libro *Física conceptual*, de P. Hewitt (ver la sección de Bibliografía).

La información sobre investigaciones históricas y actuales permite abordar la luz de una manera contextualizada, ilustrando algunos aspectos de la actividad científica, por ejemplo cuál es el papel de las personas (tanto los científicos como los que no lo son) y cómo intervienen los supuestos, experiencias y casualidades en el desarrollo de la ciencia y la tecnología.

En este libro se proponen algunos abordajes puntuales de la luz desde la cultura. Para ello se incluyen fragmentos de obras literarias argentinas donde aparecen algunos de los fenómenos que presentamos desde la física. Así, se incluyen partes de novelas, cuentos y poemas donde se tratan por ejemplo los colores, la refracción, los espejos o la visión que ofrecen una alternativa para el abordaje multidisciplinar de los contenidos, y acercan otras miradas creativas sobre los mismos fenómenos.

Invitamos a los lectores a un intercambio de ideas (a través de discusiones, visitas, correo electrónico, etc.) que nos sirva para mejorar nuestra

forma de comunicar las ideas e historias relacionadas con la física que compartimos desde el Museo.

El material digital está disponible en
http://museo.fisica.unlp.edu.ar/luz_verde_material_digital



Agradecemos a:

- Daniel Sergnese por su apoyo y gestiones que permitieron la publicación de este libro.
- Casiana Rodríguez por su diseño editorial.
- Los ilustradores que interpretaron y embellecieron nuestras palabras con su arte: Lucía Guala, Florencia Della Védova, Ramiro Rangil, Mariela Theiller, Agustín Grenno, Roberto Escobar, Agustín Bucari, Roberto Pérez Escalá, Rö Barragán, Lido Iacopetti, Gastón Sergnese, Maite Peláez, Juan Carlos Chaves.
- Nuestros compañeros del Museo de Física, porque con ellos construimos esta manera de compartir la física.
- Florencia Buret, quien nos asesoró respecto de las obras literarias incluidas aquí.
- Marcela Andruchow y Federica Rampf por su asesoramiento y sus reseñas sobre la luz en las artes plásticas.
- Andrés Dragowski por su texto sobre la historia de las lentes.
- Damián Gulich por su colaboración en las imágenes y su texto sobre fotones.
- Diego Petrucci, por sus sugerencias pedagógicas y su texto acerca de las representaciones de los niños sobre la luz.
- Agustina Ponce, María Sol Rodríguez Varela, Martín Andrés Ledesma, Patricio D'Hurch y Patricia Isoardi, todos ellos alumnos del Instituto Fray Mamerto Esquiú de City Bell, quienes de la mano de Emilia Deleglise y gracias a la iniciativa de la profesora Graciela Santa, se acercaron al Museo de Física para colaborar con la puesta a punto de las construcciones que integran el material digital.
- Gastón Giribet y Guillermo Abramson, David Jou y Marià Baig por permitirnos utilizar sus textos.
- Alberto Lencina por su minucioso trabajo de recopilación sobre las actividades de los investigadores en óptica de Argentina y su valiosa reseña sobre los temas de mayor impacto.

- Mariana Santamaría por su ayuda con las imágenes y el diseño del material digital.
- Carlos Rando del Centro Científico Tecnológico CCT CONICET La Plata.
- Área de Relaciones Institucionales CCT CONICET La Plata: por correcciones y sugerencias.
- José Edelstein: por su generoso prólogo.
- La Asociación de Física de Argentina.
- La Secretaría de Extensión de la Facultad de Ciencias Exactas - UNLP.

Las autoras

Los textos de este libro fueron escritos por tres docentes extensionistas del Museo de Física del Departamento de Física de la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de La Plata - UNLP: Paula Bergero, Cecilia von Reichenbach y Florencia Cabana.

Paula es Física y Doctora en Ciencias Exactas. Es investigadora del CONICET y trabaja en el modelado matemático de enfermedades infecciosas.

Cecilia es Doctora en Física. Es investigadora del CONICET y estudia la historia de la física en Argentina.

Florencia es Profesora en Física y Matemática. Trabaja en la formación de nuevos docentes en ciencias.

Las tres se dedican a la comunicación pública de las ciencias y son coautoras de las otras dos publicaciones del Museo: “Cero absoluto, Curiosidades de Física” (2005, 2009) y “Polo Sur, Experimentos de Electromagnetismo” (2010).

Capítulo 1

¡Qué fenómeno la luz!

La claridad del día, el fuego, la luna, las estrellas, rayos, centellas y relámpagos, son todas manifestaciones naturales de la luz que desde siempre interesaron a la Humanidad, así como la fluorescencia de la “luz mala” y la de las luciérnagas. También fueron siempre de gran interés las manifestaciones de luz generadas por los humanos como faroles, linternas, leds y láseres. Colores, sombras, reflejos, transparencias. Todos los que poseemos el sentido de la visión recibimos información sobre estos “efectos luminosos” desde que nacimos, y por ello nos resultan naturales. Sin embargo, la esencia de la luz, su identidad y definición, ha sido protagonista de interpretaciones religiosas, mágicas y supersticiosas desde hace muchos siglos, y más recientemente se convirtieron en uno de los objetos de estudio de la ciencia. Ésta proporcionó distintos modelos¹ para interpretar las diferentes manifestaciones de la luz, construyendo y reconstruyendo ideas en el intento de generalizar propiedades en común entre los fenómenos conocidos y comprender y predecir otros nuevos. Lo cierto es que se avanzó mucho y los resultados obtenidos muestran que no hay un modelo único que se aplique a todos los fenómenos luminosos, sino que existen distintas alternativas que se emplean según las características de la manifestación luminosa a estudiar (de esta “dualidad” hablaremos más adelante). Pero lo más interesante es que, aunque se haya progresado en el conocimiento, la luz aún continúa siendo un campo de estudio para la ciencia, y una fuente de regocijo para la Humanidad.

1 Los modelos a los cuales nos referimos aquí son aquellas estructuras simplificadas que proponemos los físicos para comprender algún fenómeno, identificando las características fundamentales de nuestro sistema de estudio para descartar las irrelevantes, elegir las fronteras que lo separan del entorno y las variables que entran en juego.

Noctiluca. Fragmento de canción de Jorge Drexler (2010)

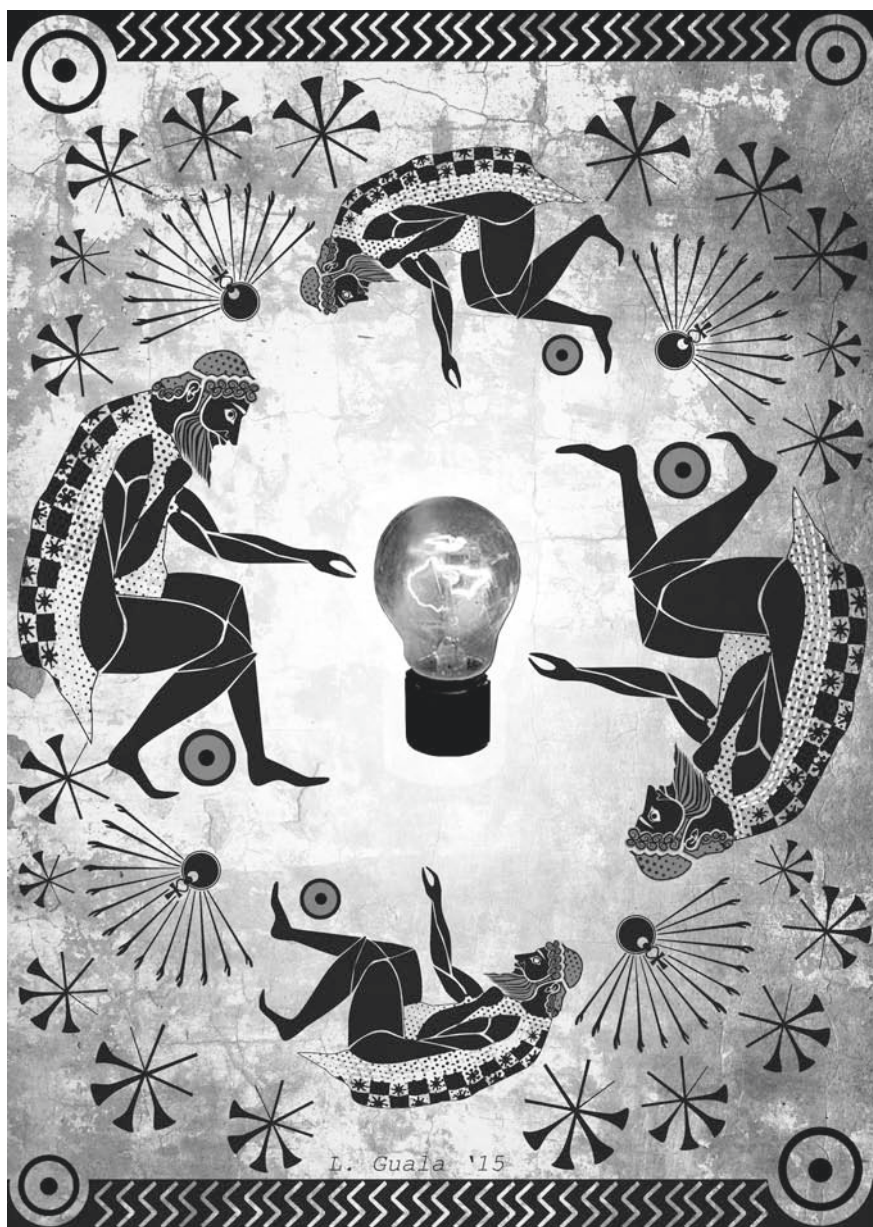
*Tenía la edad aquella en que la certeza caduca,
y de pronto al mirar el mar vi que el mar brillaba
con un brillar de noctilucas.
Algo de aquel asombro debió anunciarme que llegarías,
pues yo desde mis escombros al igual que el mar sentí
que fosforecía.
Supe sin entenderlo de tu alegría anticipada.
Un día entenderás que habla de ti esta canción
encandilada.
Brilla noctiluca,
un punto en el mar oscuro,
donde la luz se acurruca.*

Jorge Drexler: cantautor y otorrinolaringólogo uruguayo (1964). Autor, entre otros, de los álbumes “La luz que sabe robar” (1992) y “12 segundos de oscuridad” (2006).

Las noctilucas, o “luz de noche”, son algas unicelulares que tienen la capacidad de generar bioluminiscencia cuando reciben algún tipo de estímulo. Son las que provocan el brillo de la espuma de las olas de mar que vemos en noches oscuras. Las moléculas responsables de la bioluminiscencia utilizan una proteína llamada luciferina, mientras que la enzima que activa el mecanismo recibe el nombre de luciferasa.

Primeros resplandores: la luz en la antigüedad

La pregunta ¿qué es la luz? ha inquietado a la Humanidad desde que comenzó a reflexionar acerca del mundo que habita. En las más diversas culturas existen mitos y leyendas, que son un resabio dejado como sedimento de las antiguas formas de concebirla. Los primeros testimonios nos hablan de una asociación de la luz con la divinidad



Ilustra: Lucía Guala

Egipcios, persas y pueblos nórdicos, judíos, cristianos, islamitas y otros grupos humanos, asociaron de una u otra forma a la luz con deidades y creaciones míticas, a las fuerzas de la naturaleza vinculadas con el bien, la verdad, la creación del universo y la comunicación entre el mundo celestial y el terrenal. Como en tantos otros casos, tenemos mucha información de la manera en que los griegos explicaban la luz. Mientras que algunos pensadores, como Heráclito de Éfeso (544 – 484 a. C.), relacionaban el origen de la materia con el fuego, en la escuela pitagórica la forma, el orden, la luz y el reposo estaban asociados al bien, y contrariamente el desorden; en cambio, el movimiento y la oscuridad se relacionaban con la maldad. Quien tuvo mayor influencia fue Aristóteles (384 - 322 a. C.), cuyas ideas influyeron durante siglos a los pensadores, quienes sólo pudieron generar conocimientos nuevos una vez que se animaron a cuestionar sus teorías.

El quinto elemento

Entre las suposiciones de Aristóteles había una que presumía la existencia de un quinto elemento, el éter, que llenaba el espacio en el universo. Esta sustancia translúcida, brillante e indetectable pareció constituirse en el medio en el que viajaba la luz, hasta que recién en el siglo XX se descartó definitivamente su existencia. La óptica, una de las más antiguas ramas de la ciencia, estudia la luz y su propagación, así como la visión, el mecanismo que permite al cerebro interpretar la información que percibe por los ojos. Empédocles (495 - 490 a.C a 435 - 430 a.C) suponía que los ojos emiten emanaciones que, al entrar en contacto con los objetos, nos permiten conocer su forma. En esta teoría, denominada “extramisión”, la luz del Sol juega un papel secundario, pues la que posibilita la visión es la “luz emanada por los ojos”. También Platón (427 - 347 a. C.) se sumó a esta teoría suponiendo que ambas luces, la de los ojos y la exterior (proveniente del Sol, el fuego, etc.), se combinan relacionando los objetos del alma y del mundo, haciendo posible la visión. Si bien se trata de concepciones muy antiguas, a lo largo del tiempo han permanecido de alguna manera en las distintas culturas, tal como puede percibirse aun hoy en expresiones populares como “sus ojos echaban fuego”, “lo fulminó con la mirada” o “¡qué faroles!”, por ejemplo. En la actualidad, en las ideas previas de muchos niños subyacen estas concepciones.

En el Material Digital puede escucharse la obra “La historia de las miradas”, del Subcomandante Marcos, leída por Eduardo Galeano.

Realidad y leyenda del mal de ojo. Susana Domínguez Pena (2007).

“El mal de ojo es un fenómeno cultural muy extendido que ha sido explicado básicamente en relación con la envidia. Según esta creencia, una persona con el mal de ojo puede causar mal a otras personas o cosas, y su influencia puede ser contrarrestada de distintas maneras.”

“Desde muy antiguo se han asociado algunas partes del cuerpo con poderes sobrenaturales, pero sin duda es la vista y el poder de los ojos lo que más ha atraído la imaginación humana y lo que ha dado origen a mayor número de supersticiones. Se dice que el ojo es el espejo del alma, y también la luz del cuerpo, de ahí que si el ojo es bueno, el resto del cuerpo está lleno de luz; pero cuando es malo, se queda en tinieblas.”

Susana Domínguez Pena: Profesora de Filología en la Universidad de Santiago de Compostela, Chile.

Intromisión

La intromisión fue propuesta por Leucipo de Abdera (460 - 370 a.C.), y suponía que los efluvios eran emitidos por los objetos y captados por los ojos. En principio no se producían en la oscuridad, y nada podía afirmarse de su naturaleza, excepto que viajaban en línea recta. Este último no es un detalle menor, puesto que esta propiedad es la que permite que la propagación de la luz se estudie mediante las leyes de la geometría. A diferencia de otras disciplinas, en el caso de la óptica el aporte de pensadores no occidentales no pudo omitirse en la historia, ya que Abu Alí al-Hasan ibn al-Haitzam (965 – 1039), conocido en el mundo occidental como Alhazén, es mundialmente considerado el padre de la óptica. Este médico y matemático árabe fue capaz de encontrar una explicación científica al mecanismo de la visión. Dedujo que los colores que percibimos existen por sí mismos y son una propiedad intrínseca de los objetos. Propuso que los ojos son

receptores de la luz, y que las imágenes que percibimos son producidas por el reflejo en los objetos de la luz del Sol u otra fuente emisora. Los detalles de este proceso los iremos analizando en las próximas páginas.

La alteración de los medios oscuros

Dejando de lado el mecanismo por el cual se emite y se percibe la luz, hay otra cuestión fundamental: ¿de qué está hecha la luz?, ¿cuál es su naturaleza? ¿Es material o inmaterial? Las múltiples respuestas que se propusieron a lo largo de los siglos pueden agruparse en dos tipos: la luz como ondas o como partículas (concepciones corpuscular u ondulatoria). Para comenzar la retrospectiva, diremos que el modelo hegemónico propuesto por Aristóteles consideraba que la luz era la consecuencia de la “activación” o alteración de los medios oscuros como el aire y el agua, que se volvían transparentes debido a la presencia de los objetos luminosos y, dependiendo del grado de activación, transmitían los diferentes colores. Según este modelo, la luz no era una cosa, sino un estado en que se hallaba el medio. En la Edad Media se concibió una cosmogonía en la que la luz era la causa primaria de la que se derivaban la materia y el movimiento. Robert de Grosseteste (1175-1253) fue un erudito y eclesiástico inglés, autor de esta concepción, que vinculó la visión científica con una metafísica, dando respaldo “erudito” a la frase bíblica “hágase la luz”, y señaló la necesidad del uso de las matemáticas para su estudio.

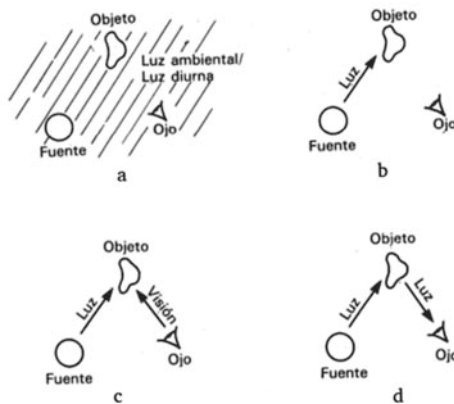
René Descartes (1596-1650) propuso un modelo muy diferente, que considera a la luz como una propiedad mecánica del objeto luminoso y también del medio de transmisión. Si bien esta teoría (llamada cartesiana) contrariamente a lo que hoy se sostiene necesitaba de la existencia de un medio material (llamado plenum) para la propagación, sus propuestas pueden tomarse como el punto de partida de la óptica moderna, por cuanto consideran a la luz como un impulso, una vibración que se propaga, en concordancia con las ideas actuales.

El aprendizaje de la luz: Ideas infantiles (y no tanto)

Por Diego Petrucci

Hace muchos años que se sabe que los niños tienen sus propias ideas sobre el mundo natural, pero hace relativamente poco que se ha comenzado a estudiarlas más sistemáticamente, bajo el supuesto de que conocer estas ideas permitirá pensar mejores modos de enseñar las teorías científicas.

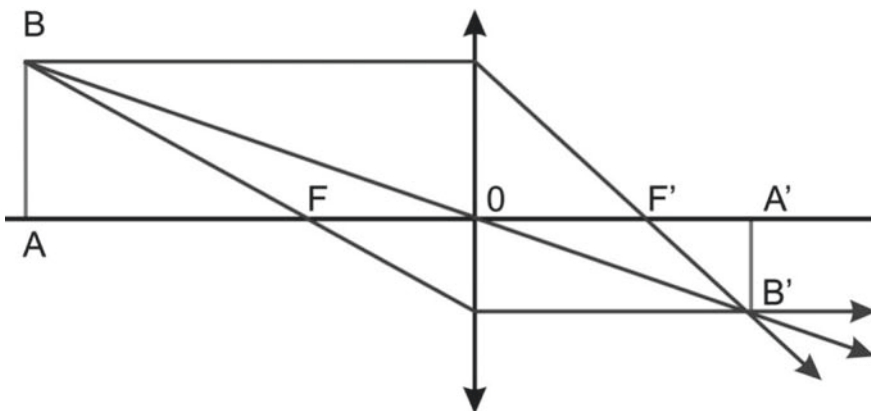
En estos estudios, al preguntarles a niños de 10-11 años -en entrevistas en un cuarto soleado -¿dónde hay luz en esta habitación? Algunos responden “en todas partes” o “en el espacio” que es lo que hubiera respondido un físico. Pero otros contestan “en el techo” o “allí arriba, pero no está encendida” señalando una lámpara. Otros marcan el sitio del piso donde da la luz del Sol que entra por la ventana, “ahí está más luminoso que en la sombra”. En resumen, muchos niños identifican la luz con su fuente: el Sol, una lámpara; o por sus efectos: los objetos iluminados. Sin embargo, algunos niños interpretan que -acorde a lo que indica la Física- la luz está en el espacio, donde hay luz propagándose. A medida que los niños crecen, esta idea se va manifestando en mayor proporción. Es interesante notar que un niño puede recurrir a más de una de estas concepciones, incluso durante la explicación de un mismo fenómeno. Aprendimos que la aparición de una nueva concepción no “borra” a la anterior.



Esquemas de las ideas de los niños sobre los mecanismos de visión de un objeto. Driver (1989).

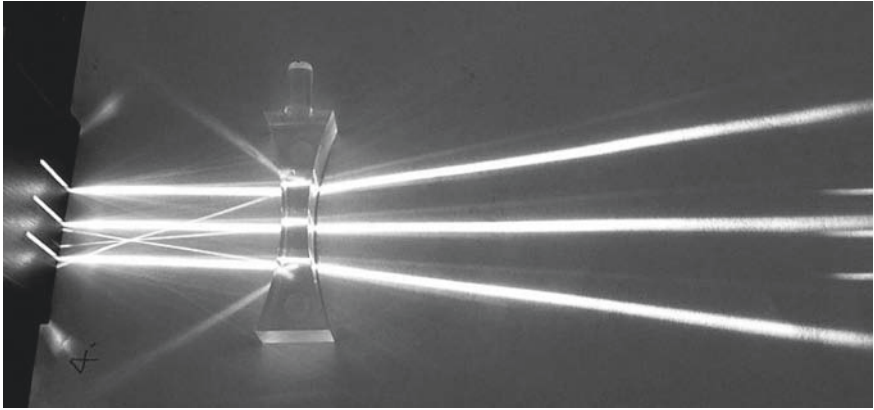
Las dos primeras concepciones son mayoritarias, siendo la primera, la más difusa, más común en niños pequeños. Pocos niños manifiestan la idea del ojo como agente activo. Es notable que esta noción la encontramos en la historia antigua, como en la teoría del “fuego visual” de Platón. También está presente culturalmente en frases como “lo fulminó con la mirada”, incluso en la idea de la visión de Rayos X de Superman. Finalmente, son pocos los niños que expresan la cuarta concepción, que es la que coincide con la científica.

Es importante para los docentes conocer las concepciones predominantes para cada edad, pues se pueden dar por sentado conocimientos supuestamente básicos para la ciencia y que los alumnos no han alcanzado. Además, conocer qué es lo que los alumnos saben, nos permite planear la enseñanza bajo el supuesto de que se aprende como resultado de interactuar con el mundo, elaborando el conocimiento al relacionar lo nuevo con lo que ya se sabe. Por otra parte, en ocasiones la propia enseñanza genera “nociones alternativas” a las científicas. Por ejemplo, al enseñar óptica geométrica se utilizan esquemas para mostrar la marcha de rayos, como el siguiente:



Esquema típico de libro de texto que ilustra la marcha de rayos a través de una lente delgada, y puede inducir la noción de que los rayos de luz se ven.

Este esquema puede generar la noción errónea de que los rayos de luz se ven. Según la Física, lo que vemos es el resultado de la incidencia de rayos de luz en nuestros ojos. Esta noción alternativa también puede inducirse mediante dispositivos didácticos, como los empleados en ocasiones en los módulos de los museos interactivos de ciencia, como el que muestra la figura.



Dispositivo para mostrar la marcha de rayos a través de una lente. Al no aclarar que lo que estamos viendo es la luz de la fuente reflejada en la mesa que sirve de base del dispositivo, se induce la idea errónea de que los rayos de luz se ven.
https://en.wikipedia.org/wiki/File:Concave_lens.jpg. Creative Commons.

En estos módulos la fuente de luz está detrás de una ranura vertical y sin advertir al visitante, la luz se emite de modo que sea reflejada por la base del dispositivo, antes y después de atravesar -por ejemplo- una lente. De ese modo el visitante cree que está observando cómo un rayo es desviado por una lente, mientras que lo que observa es la luz reflejada en la base del dispositivo, antes y después de atravesar la lente.

En resumen, muchos adultos piensan que la luz se ve. Si así fuera, no podríamos ver los objetos en una habitación iluminada, pues en ella hay luz en todas partes. Es paradójico, pero a la luz no se la ve.

Cabe destacar que las investigaciones en enseñanza de las ciencias han demostrado que estas ideas se modifican bastante poco con la enseñanza. Hace varios años que se está trabajando en la cuestión, con la idea de

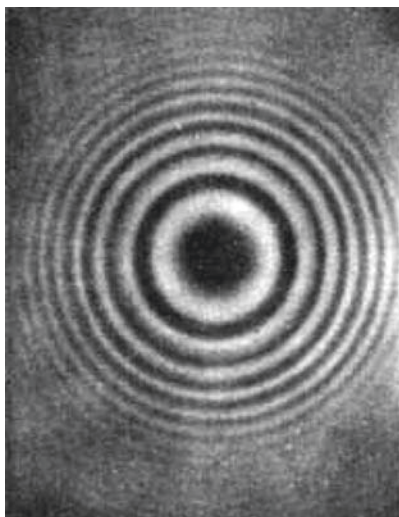
avanzar hacia una enseñanza de las ciencias más efectiva, pero también que logre que las ciencias sean más atractivas para los jóvenes.

Este texto se nutre de varias fuentes, pero se destaca el trabajo de Edith Guesne “La luz” (Driver, 1989).

Y sigue resplandeciendo: la luz en la modernidad

Newton, el señor de los anillos

Uno de los grandes cambios conceptuales llegó de la mano de Isaac Newton (1643-1727), que propuso considerar a la luz como formada por pequeños cuerpos que impactan en el ojo y, según su tamaño, producen los diferentes colores. Esta idea le permitió estudiar algunos fenómenos luminosos utilizando las leyes de la mecánica: por ejemplo, la reflexión, como un rebote de pequeños corpúsculos, y la refracción, cuando la luz pasa de un medio transparente a otro, explicada como un cambio en la velocidad de las partículas de luz. No sirvió, sin embargo, para explicar otros fenómenos en los que se observaba cierto comportamiento periódico, como la difracción y la interferencia, en las figuras que paradójicamente se llamaron “anillos de Newton”. Entre los años 1660 y 1690 se conocieron en Europa estos efectos, y también otro, llamado polarización, que no podían ser descritos en términos de corpúsculos. Como veremos con detalle más adelante, todos estos fenómenos pueden ser entendidos proponiendo para la luz un modelo de ondas. Fue este modelo, sin duda generado a partir de concepciones anteriores, que permitió explicar las observaciones de difracción, interferencia y polarización de luz efectuadas hasta el siglo XVII por distintos experimentadores. Lo propuso el astrónomo y físico holandés Christian Huygens (1629-1695), quien planteó una analogía con el sonido, considerando la propagación de la luz como la de una onda. En el caso de la refracción esto se constituyó en un modelo alternativo, ya que la teoría de Newton podía explicarla en términos de corpúsculos. Lo que no podía ser explicado por la teoría corpuscular era la interferencia entre dos haces luminosos, descubierta simultáneamente por los físicos británicos Robert Boyle (1627-1691) y Robert Hooke (1635-1703). Como nota de color digamos que este último fue un científico notable, pero tuvo la desgracia de ser contemporáneo de Newton, que ensombreció con su fama (y otros artilugios) el reconocimiento que merecía, entre otros aportes, por sus avances en la óptica.



Anillos de Newton. Patrón que se observa en una pantalla cuando la luz atraviesa dos superficies: una lente y un espejo plano.

Luz + luz = oscuridad

El enigma de la interferencia -que surge de una experiencia que explicaremos con detalle más adelante- puede ser resumido en la forma: luz + luz = oscuridad, y pudo ser entendido gracias al aporte de varios científicos. Uno fue el británico Thomas Young (1773-1829), que realizó experiencias en las que dos haces de luz interferían para dar luz más brillante, en unos casos, y oscuridad, en otros. El matemático suizo Leonhard Euler (1707-1783) formuló la teoría correspondiente, apoyándose otra vez en la analogía entre la propagación de la luz y el sonido. Finalmente, la forma matemática de este modelo, muy resistido por los “físicos corpusculares”, fue desarrollada por el ingeniero francés Agustín Fresnel (1788-1827).

Así, la mayor parte de los fenómenos luminosos conocidos en el siglo XVII tenían una o más formas de analizarse satisfactoriamente. Lo único que no podían explicar era el hecho de que la luz se propagase sin un medio material que la sustentara. Por analogía con el sonido, imaginaron que era necesaria la existencia de materia, aunque indetectable, y recurrieron a la antigua idea de éter, concepto sugerido por Aristóteles. Un aporte

curioso es el del químico francés Antoine Lavoisier (1743-1794), que propuso una tabla de elementos (la que posteriormente modificó y completó Mendeleiev) que incluía a la luz como uno de ellos, junto con el calórico, el oxígeno, el hidrógeno y el nitrógeno.

Perturbaciones viajeras

La teoría y el desarrollo matemático que culminó el modelo ondulatorio fueron obra de James Clerk Maxwell (1831-1879), un físico escocés que es considerado uno de los más grandes científicos de la historia. El primer paso importante fue escribir una serie de ecuaciones matemáticas que sintetizaban los resultados hallados en las recientes investigaciones sobre la electricidad y el magnetismo, y las relaciones entre ellas. Resumían el hecho de que las alteraciones magnéticas tienen su contrapartida eléctrica, y viceversa. Ambas perturbaciones se propagan en el espacio a una velocidad constante, llamada c . Maxwell comprendió que ese valor era el de la velocidad de la luz en el medio, y que éste podía ser simplemente el espacio vacío, con lo cual evitó la necesidad de la existencia del éter. Su hipótesis entonces era considerar a la luz como la propagación de perturbaciones eléctricas y magnéticas del espacio, en lo que llamó ondas electromagnéticas. Unos años más tarde el físico alemán Heinrich Hertz (1857-1894) realizó experimentos que le permitieron generar y detectar estas ondas, confirmando así las ideas de Maxwell. La constante c , que tiene un valor de 299.792.458 metros por segundo en el vacío, pudo ser medida con gran exactitud, y se hizo famosa en 1905, con la Teoría Especial de la Relatividad.

No todo es relativo

Einstein mostró que c es una velocidad muy particular, dado que es independiente de la forma en que haya sido generada la luz y del sistema de referencia desde donde se la observe: representa un límite máximo, absoluto. Eso quiere decir que nada puede moverse a mayor velocidad que c , lo que constituye por lo menos una hipótesis muy arrojada. Lo único que puede viajar a esa velocidad es la luz, y Einstein la consideró como formada por partículas portadoras de energía, llamadas fotones: ¡otra vez se vuelve al modelo corpuscular! Y es que hay algunos fenómenos, como el efecto fotoeléctrico (que describiremos más adelante), que sólo

pueden ser explicados usando esa idea. Se trata de hechos en los que la interacción entre la materia y la luz debe ser considerada a nivel microscópico. Sin embargo, la forma matemática de esta teoría acude a las ondas para describir la evolución de los fotones y su interacción con las partículas que componen la materia. De hecho, cuanto menor sea la escala a la que miramos la naturaleza, esta interpretación dual onda-partícula tienen consecuencias que -aunque contradicen nuestra intuición- coinciden con los resultados obtenidos experimentalmente. Así, según de qué fenómeno se trate, y a qué escala estemos observando, será más apropiado usar un modelo u otro. Corpúsculos, rayos, ondas, son elementos de los que nos valemos para seguir adelante en el desafío de entender el universo y sacar provecho de ese conocimiento. Sin embargo estamos muy lejos de entender qué es la luz.

El acomodador. Fragmento del cuento de Felisberto Hernández (1947)

Pero en uno de aquellos días más desgraciados apareció ante mis ojos algo que me compensó de mis males. Había estado insinuándose poco a poco. Una noche me desperté en el silencio oscuro de mi pieza y vi en la pared empapelada de flores violetas, una luz. Desde el primer instante tuve la idea de que ocurría algo extraordinario, y no me asusté. Moví los ojos hacia un lado y la mancha de luz siguió el mismo movimiento. Era una mancha parecida a la que se ve en la oscuridad cuando recién se apaga la lamparilla; pero esta otra se mantenía bastante tiempo y era posible ver a través de ella. Bajé los ojos hasta la mesa y vi las botellas y los objetos míos. No me quedaba la menor duda; aquella luz salía de mis propios ojos, y se había estado desarrollando desde hacía mucho tiempo. Pasé el dorso de mi mano por delante de mi cara y vi mis dedos abiertos. Al poco rato sentí cansancio; la luz disminuía y yo cerré los ojos. Después los volví a abrir para comprobar si aquello era cierto. Miré la bombita de luz eléctrica y vi que ella brillaba con luz mía. Me volví a convencer y tuve una sonrisa. ¿Quién, en el mundo, veía con sus propios ojos en la oscuridad?

Felisberto Hernández: músico y literato uruguayo (1902-1964).

Capítulo 2

Desfile de modelos: la mirada de la Física

Como hemos mencionado, la filosofía, y luego la física, intentaron dar respuestas racionales a la pregunta ¿qué es la luz?, y a otras relacionadas que fueron surgiendo. Muchas personas en diferentes momentos de la historia tomaron a la luz como objeto de su estudio y arribaron a distintas representaciones, a veces divergentes en sus análisis y otras superadoras. La física actual propone hablar de la luz desde tres representaciones complementarias: el de rayos, el de partículas o corpuscular y el de ondas u óptica física. El primer modelo es suficiente para estudiar la reflexión y la refracción. El modelo de ondas puede también tratarlos, y resulta además adecuado para entender algunos fenómenos como difracción, interferencia, polarización, y para hablar de colores. La descripción de la luz en términos de partículas llamadas fotones fue la última en formularse y surgió para explicar la interacción entre la luz y la materia. Al necesitar tres modelos para estudiarla debemos modificar la pregunta ¿qué es la luz?, y buscar en cambio describirla, entender su comportamiento, predecir fenómenos que la involucren y diseñar tecnología que la aproveche. Un resultado insospechado de estas propuestas es que brindaron la posibilidad de abordar no sólo la luz sino también otros tipos de radiaciones como los rayos X; las señales de radio y televisión; y las microondas. Aún más, a escalas extremadamente pequeñas algunos de estos modelos han servido para describir satisfactoriamente el comportamiento de la materia.

Aunque comentaremos los tres modelos, en este libro elegiremos el modelo de ondas para el desarrollo de la mayor parte de los contenidos.



Ilustra: Florencia Della Védova

¡Rayos!

Una característica de la luz es que, en un gran abanico de circunstancias, cuando viaja lo hace siguiendo una trayectoria rectilínea. El concepto de rayo luminoso se fundamenta en la propagación en línea recta. Es una idea bastante intuitiva y aparece en el lenguaje cotidiano: hablamos por ejemplo de los rayos del sol o del láser. Cada rayo es entonces una representación de un haz de luz muy estrecho y se lo dibuja como una flecha, indicando el camino que sigue la luz.

Según este modelo, los objetos visibles emiten o reflejan rayos de luz en todas direcciones. Aquellos que inciden sobre nuestros ojos son los responsables de que los veamos.

Este modelo resulta adecuado para la interpretación sencilla de aquellos fenómenos en los cuales la luz puede ser considerada como un conjunto de rayos que viaja por distintos medios, a distintas velocidades y que sufre cambios como reflexión, refracción, dispersión y atenuación. Este conjunto de efectos y fenómenos se agrupan bajo el nombre de óptica geométrica debido a que la geometría es la herramienta teórica que permite realizar la representación correspondiente.

Idas y vueltas de la luz: Reflexión

Podemos ver el destello de la luz del sol sobre la superficie de un charco de agua. Podemos ver las luces de los autos en el espejo retrovisor. Podemos ver nuestra propia imagen en el vidrio de los negocios, al mirar vidrieras. Todos estos son ejemplos de un fenómeno conocido como reflexión de la luz, que se produce siempre que la luz llega a una superficie que separa dos medios. Pero también podemos ver los objetos detrás de las vidrieras y el tapón de la bañera aún cuando está llena de agua. Cuando la luz llega al límite entre dos superficies, en principio ocurren dos cosas: una parte de la luz se refleja y otra parte se transmite. En esta Sección nos ocuparemos de la primera.

Al iluminar superficies bien pulidas, como los espejos, la mayor parte de la luz será reflejada en una sola dirección. Esta reflexión se llama especular o simplemente reflexión.

En cambio, los objetos de superficie irregular -por ejemplo, una manzana- reflejan la luz en todas las direcciones, y es por eso que los podemos ver desde distintos ángulos. Este fenómeno se llama reflexión difusa o difusión de la luz. Por eso mismo, seremos capaces de ver la trayectoria de la luz si en su recorrido existen partículas pequeñas que la difundan. Por ejemplo, no vemos a simple vista el haz proveniente de una linterna, pero si hay polvillo o tierra en suspensión, sí tendremos la oportunidad de apreciarlo.

Espejito, espejito

¿Qué hay del otro lado del espejo? ¿Esa persona que me mira es igual a mí? ¿Dónde está? Como ya mencionamos, una superficie capaz de reflejar prácticamente toda la luz que llega funciona como lo que llamamos espejo. Los hay planos o curvos: esféricos, parabólicos, cilíndricos, entre otros. A su vez los curvos pueden ser cóncavos o convexos, según qué cara esté pulida.

Los espejos planos forman la imagen del otro lado, y por eso la llamamos virtual. Además, mantienen la simetría de aquello que reflejan, aunque lo invierten de derecha a izquierda. La imagen no aparece invertida, tiene las mismas dimensiones y forma que el objeto. Pero con los espejos curvos se pueden formar imágenes con características muy diferentes al objeto que se pone enfrente. Según la curvatura y la distancia a la que se encuentra, el espejo puede formar imágenes invertidas, de mayor o menor tamaño y hasta deformadas. Sólo basta mirarse en ambos lados y a diferentes distancias de una cuchara sopera para observar la diversidad. También, aunque es más difícil, con espejos curvos se pueden lograr imágenes reales, es decir, que están del mismo lado que aquello que se está reflejando.



Imagen real y 3D de una chanchita de juguete formada por dos espejos cóncavos en el Museo de Física.

Al espejo. Fragmento del poema de Jorge Luis Borges (1974)

*¿Por qué persistes, incesante espejo?
¿Por qué duplicas, misterioso hermano,
el menor movimiento de mi mano?*

Jorge Luis Borges: (1899-1986) escritor y poeta argentino considerado el mayor exponente de la literatura argentina del siglo XX.

Luz que se transmite: Refracción

Algunas culturas, como por ejemplo los onas y tehuelches del sur de Argentina, tenían a la pesca con lanza como uno de sus medios de vida. La pesca con lanza se realiza en aguas cristalinas: el pescador con los pies sumergidos en el agua espera hasta identificar a su presa, y luego arroja la lanza traspasando al pez. Este sencillo procedimiento tiene una dificultad especial relacionada con la luz: el lugar donde vemos el pez no es en realidad el lugar donde está. ¿Qué ocurre? La luz que refleja el pez viaja por el agua y al llegar a la superficie pasa al aire, por donde viaja hasta llegar a nuestros ojos. Pero en el pasaje de un medio al otro, la luz cambia de dirección y por eso la percibimos como proveniente de otro

lugar: para nuestro cerebro el pez está un poco más lejos del sitio que ocupa en realidad.

Es el mismo fenómeno que hace que un lápiz “se quiebre” cuando lo sumergimos en un vaso con agua. Cuando la luz se transmite a través de la superficie de separación de dos medios materiales transparentes se lo denomina refracción. Cuando esto sucede, el rayo refractado tiene una dirección diferente al rayo incidente debido a que la luz tiene velocidades diferentes según los medios materiales que atraviesa. Con medio material nos referimos a aire, gases, tierra, metales, madera, agua y otros líquidos... y todo aquello que esté formado por átomos y moléculas. La velocidad con que la luz viaja en el vacío es $c = 299.792.458$ metros/segundo, pero en cualquier otro medio es menor.

Cada material puede ser caracterizado por lo que llamamos índice de refracción, que se define como el cociente entre la velocidad de la luz en el vacío y la que tiene en el material: $n = c/v$.

Como ya mencionamos, la reflexión y la refracción son fenómenos que en general encontramos juntos, porque la luz al llegar a una superficie que separa dos materiales se refleja y se refracta. Pero en algunas condiciones, los medios transparentes reflejan totalmente la luz como si fueran espejos, sin que ocurra también la refracción. Si tomamos un vaso translúcido con agua y lo observamos desde abajo y en cierto ángulo, es posible notar que la superficie interior de agua refleja especularmente las imágenes. Este fenómeno se llama reflexión interna total y se puede dar cuando la luz se encuentra con una superficie de otro material de índice de refracción mayor, por ejemplo, desde el agua del vaso al aire. Es lo que ocurre dentro de las fibras ópticas, que transmiten información mediante la propagación de luz con una mínima pérdida de energía.

El lobizón. Fragmento de un cuento de Manuel Mujica Láinez (1976).

“Don Pedro ha quedado atónito también. Le parece que esa visión es trampa de la temperatura y de la sed que le quema la garganta. ¿No será un espejismo como los que acosan a las caravanas en los arenales? Jamás ha visto mujer tan bella.”

Manuel Bernabé Mujica Láinez: escritor, crítico de arte y periodista argentino (1910 -1984). El relato se ambienta en Buenos Aires en el siglo XVII.

Lentes

Se llama así a todo medio transparente (por lo general, vidrio) limitado por dos caras, de las cuales al menos una es curva. Su forma puede recordar una lenteja, y de esta similitud, precisamente, proviene su nombre, originariamente en latín.

Historia de las lentes

Por Andrés Dragowski

Una historia de las lentes no puede pensarse sin contexto. Además, ya sea como objeto artesanal o industrial, siempre adquiría utilidad cuando se la combinaba con otros instrumentos y cuando se la insertaba en otros aparatos o invenciones. Al igual que cualquier invento, encontramos a las lentes desplazarse constantemente, a la par de los hombres, en sus viajes y negocios. El gran historiador Fernand Braudel sostenía que con las mercancías siempre circulaban las ideas. Y las lentes, esos objetos siempre un poco misteriosos, eran portadores de grandes ideas. Entre el 1400 y el 1800, sostiene Braudel, el mundo vivió un constante desplazamiento de mercancías, tecnología e ideas. Las lentes no tuvieron el papel protagónico. La tecnología que más circuló fue la militar, y específicamente, la pólvora. No obstante, en todo buque, en toda travesía, una lente viajaba

escondida en forma de catalejo, en el bolsillo de un marino o comerciante. Las tecnologías, sostiene Braudel, una vez surgidas, nunca permanecían al servicio de un solo grupo de interés, a menos que ese grupo la retuviese en forma de secreto o a los demás no les interesase. En general, cualquier saber tecnológico terminaba por “desnacionalizarse”. En ese sentido, identificar con total certeza el lugar de invención y el autor de la primera lente es una tarea quimérica. No obstante, es posible encontrar lentes más abundantemente a partir del siglo XIII, cuando se inventan los anteojos, probablemente en el norte de Italia. En ese mismo siglo, en Inglaterra, el filósofo natural Roger Bacon, profundizando en estudios de óptica, recomendaba a los miopes el uso de anteojos para aligerar su condición. Los proveedores eran artesanos, vidrieros y cristaleros, que comenzaron a realizar modificaciones en sus obras en el contexto del crecimiento de la demanda de anteojos a causa de la popularización de la lectura y por lo tanto de las molestias oculares de los lectores. Con la invención de la imprenta en el siglo XVI explota la demanda de anteojos.

Entre los numerosos adelantos, logros, descubrimientos y redescubrimientos que caracterizan el Renacimiento, los estudios de las lentes y sus usos son difíciles de rastrear, pues se pierden en la marea de innovaciones tecnológicas que se disfrutaron. Los artistas-técnicos renacentistas en general, y da Vinci en particular, se interesaron por la óptica no en base a un interés específico en el “artefacto lente” propiamente dicho, sino en base a un tipo de interés que podríamos denominar “genérico”. La filosofía renacentista era, en muchos aspectos, pre-científica, no dividía el saber en los campos que hoy denominamos “ciencias sociales” y “ciencias naturales”. Todos los elementos del mundo eran las manifestaciones y atributos materiales de un orden más amplio. El artista del Renacimiento veía en la “forma”, y no en la “parte”, la unidad constitutiva del universo, los remolinos que se forman en el agua eran la explicación de las corrientes de aire y viceversa. En este sentido, el interés de da Vinci por la óptica no venía dado simplemente por la curiosidad respecto al funcionamiento de los ojos, sino a la relación entre éstos y la luz en función de una total comprensión de la “forma” de la naturaleza, que él buscaba imitar en la pintura. Sin proponérselo conscientemente, da Vinci iniciaba los estudios en óptica, pero aún se necesitaban otros cambios de paradigma. No es que antes no hubiesen existido actividades o experiencias en las cuales los hombres

manipulasen partes de la naturaleza con el fin de observar fenómenos. Pero, como vemos, tales experiencias se llevaban a cabo bajo el imperio de un universo conceptual distinto al que eventualmente fundamentará la ciencia moderna. Es decir, hasta el siglo XVII la relación entre ciencia y tecnología como la conocemos hoy no aparecerá. Por un lado, los estudiosos practicaban la Filosofía Natural. Por otro, fuera de los cenáculos de sabios y eruditos, la tecnología permanecía bajo el dominio de las cofradías de artesanos, organizados bajo leyes de carácter feudal, y recelosos de las innovaciones técnicas.

En el siglo XVII tuvo lugar un proceso de surgimiento de paradigmas anclados fuertemente en la Física, que proponían reinterpretar el mundo bajo una mirada nueva. Bacon, en la década de 1620, definió un pensamiento que se ha dado a llamar “materialista”. Proponía que los estudios naturales debían fundarse en la detección de la existencia de “hechos irreductibles”, observables directamente y distintos de cualquier deducción o inferencia que posteriormente puedan realizar los hombres. Esta postura consagró al método experimental como forma legítima de acceder al conocimiento. En ese contexto, siguiendo el rastro de las lentes moviéndose por el mundo, las encontramos en el taller de Galileo Galilei, en forma de telescopio, y siendo apuntados a la Luna. Galileo lo utilizó como nadie lo había usado, pero él no inventó el telescopio. El telescopio como artefacto surge desde el interior de las cofradías de artesanos, y de una forma fortuita. Hans Lippershay era un holandés, pulidor de lentes, contemporáneo a Galileo. Cierta día, uno de sus aprendices unió dos lentes y al observar a través de ellas vio que los objetos se agrandaban. Lippershay encerró esas lentes en un tubo, para sujetarlos mejor, inventó el telescopio e intentó vendérselo al gobierno holandés, al constatar el evidente uso militar del artefacto. También, típica estrategia del artesano del entonces, intentó mantener el secreto del diseño, pero los rumores llegaron a Galileo, quien fabricó muchos y los regaló a sus amigos y colegas dispersos por toda Europa. Junto al avance del método experimental como único método legítimo de la ciencia, este hecho posicionó a las lentes como elementos de saber. El logro de Galileo también generó una ruptura en lo que hasta ese entonces era la diversidad de los instrumentos para investigación. Hasta el siglo XVI abundaban los por entonces llamados “instrumentos matemáticos”, diseñados para calcular posiciones y medir el tiempo, y usados principalmente

en arquitectura y navegación. El éxito de Galileo en el uso del telescopio generó una transformación puesto que permitió a los mencionados fabricantes de anteojos especializarse en la construcción de telescopios, inaugurando el mercado de los instrumentos ópticos.

La producción industrial de vidrio para instrumentos ópticos se inicia, tímidamente, a finales del siglo XVII, cuando la producción de los mismos deja de ser monopolio de los artesanos, y los inventores particulares, científicos e industriales pueden disponer de su producción. El vidrio óptico se desarrolló primero en Suiza por Paul Louis Guinand, que luego emigró a Munich, asociándose con Joseph von Fraunhofer, quien inventó el espectroscopio. Entre ambos logran sentar las bases para la producción industrial de material óptico. El uso de anteojos y lentes para enviar mensajes lumínicos ya existía en las mentes de muchos pero solo encuentra un incentivo práctico y estratégico para su implementación en Francia, en 1793. El gobierno revolucionario comisionó al inventor Claude Chappe para que crease una red de “telégrafo óptico”, usando postes con espejos y lentes que reflejaban un rayo, comunicando dos puntos. Ese sistema solo fue superado por el telégrafo eléctrico a mediados del siglo XIX.

El contexto donde se inicia la rápida evolución de la lente y del conocimiento óptico como objeto de interés científico, y ya no artesanal, se da sin duda en el período llamado de la Revolución Industrial, desde fines del siglo XVIII, en Inglaterra, y a lo largo del siglo XIX en el resto de Europa. Las lentes caen en las manos de la industria y su estudio se convierte en monopolio de los científicos y técnicos. Los debates en la primera mitad del siglo XIX entre los partidarios de la teoría corpuscular de la luz y los adeptos a la tesis ondulatoria propiciaron el descubrimiento y desarrollo de diversos experimentos para los cuales se diseñaban las lentes apropiadas o priorizaban determinados materiales y formas de construir ese material. La óptica de los medios cristalinos nace producto de la síntesis matemática de Augustin Jean Fresnel, que no hubiese podido llevarse a cabo sin la base de los trabajos de Thomas Young y antes de él, Christiaan Huygens. Estos debates marcaron la importancia de las lentes, que desde entonces se transformaron de diversas maneras al ritmo de los avances de las investigaciones en física hasta adoptar numerosas formas dentro de nuestra vida cotidiana.



Ilustra: Ramiro Rangil

Rayos en el ojo

El modelo de rayos nos ofrece una descripción de los defectos refractivos que podemos encontrar en el funcionamiento del ojo y que ocasionan dificultades para la visión.

Para obtener una imagen nítida, el ojo debe conseguir que los rayos de luz provenientes de distintos puntos del objeto mirado, que le llegan paralelos, converjan exactamente sobre la retina, que es la “pantalla” donde deberían hacerlo para que la visión sea correcta. Si lo hacen antes o después, la imagen no se verá “enfocada”. El cristalino, un tejido transparente, incoloro y flexible, es el principal responsable de cambiar la trayectoria de los rayos que lo atraviesan. Está sujetado por los músculos ciliares, que le confieren al ojo una característica muy especial: el poder de acomodación. Es decir, pueden “tirar” del cristalino para cambiar su curvatura, radio y, por lo tanto, su distancia focal y, de esta manera, enfocar objetos a distintas distancias. Cuando el ojo está en reposo enfoca objetos lejanos.

Si aquello que queremos mirar se acerca, los músculos ciliares traccionan del cristalino, achicando su radio y disminuyendo la distancia focal. Si el objeto se acerca aún más, los músculos ejercen aún más fuerza sobre el cristalino y vuelve a enfocar la imagen. Sin embargo, esto tiene un límite: el llamado punto cercano, que es el punto más cercano que se puede enfocar. Con la edad, este poder de acomodación va disminuyendo pues el cristalino va perdiendo su flexibilidad y los músculos ya no pueden deformarlo tanto. Esta anomalía se denomina presbicia.

La miopía es un defecto de refracción del ojo en el cual los rayos de luz que le llegan paralelos (provenientes de algo que está lejos), luego de atravesar el cristalino convergen en un punto focal que está por delante de la retina. Debido a esto, la persona miope no puede conseguir una imagen nítida de objetos lejanos.

En la hipermetropía el efecto es opuesto: los rayos de luz de objetos cercanos atraviesan el cristalino y llegan a la retina antes de converger. Como consecuencia, se ven borrosos.

En el caso del astigmatismo, ocurre que las partes transparentes del ojo -córnea y cristalino- no son completamente esféricas como cuando no hay defectos, sino que la curvatura es más plana en alguna dirección y más acentuada en otra. Consecuentemente, los rayos de luz provenientes de los objetos no convergen igualmente en todas las direcciones, de modo

que si aquellos que nos llegan de una dirección lo hacen sobre la retina, los provenientes de otra no lo harán y se verán borrosos. El ejemplo típico de astigmatismo es el de la visión de la letra E: mientras las línea vertical se ve borrosa las horizontales se ven nítidas, o viceversa.

Los defectos refractivos ocurren por varias causas, por ejemplo alteraciones en la forma del globo ocular como alargamiento o acortamiento, o porque el cristalino tenga alterada la capacidad de hacer converger los rayos, entre otras. Pueden ser corregidos con el uso de lentes apropiadas a cada caso, y también por cirugía, devolviendo a la persona una visión normal.

Positivas y negativas

Para la óptica, las lentes se clasifican en convergentes y divergentes según la forma de su curvatura. Cuando más curvas sean sus caras, mayor será la deformación de las imágenes que generan de los objetos que miremos a través de ellas. Una lente es convergente si en el centro es más gruesa que en los bordes, y su efecto es aumentar el tamaño de la imagen. Las lentes convergentes se usan por ejemplo en lupas, microscopios, anteojos para hipermetropes, etc. Se las llama también positivas, y se clasifican según su distancia focal, es decir, la distancia desde el centro de la lente al punto a donde convergen los rayos que llegan desde muy lejos. En algunos casos, invierten la imagen (la ponen “patas arriba”).

Una lupa es una lente convergente que genera una imagen aumentada de los objetos cuando se los mira a través. En el imaginario popular, son los elementos característicos de detectives y biólogos.

Bestiario. Fragmento del cuento de Julio Cortázar (1951)

Era una noche como le gustaba a ella, con bichos, humedad, pan recalentado y flan de sémola con pasas de corinto. Todo el tiempo ladraban los perros sobre las costa del arroyo, un mambo-re-tá enorme se plantó de un vuelo en el mantel y Nino fue a buscar una lupa, lo taparon con un vaso ancho y lo hicieron rabiarse para que mostrase los colores de las alas. —Tirá ese bicho —pidió Rema—. Les tengo un asco.

Julio Cortázar: escritor francoargentino, destacado por su narrativa innovadora. (1914-1984)

La lente divergente en cambio es más gruesa en los bordes que en el centro, y tiende a disminuir el tamaño de la imagen. Se las llama lentes negativas, y también se clasifican según su distancia focal. En este caso también la distancia al foco depende de la calidad del vidrio y de la curvatura de la lente. Se usan entre otras cosas para corregir la miopía.

Defectos refractivos en Argentina

Según estimaciones del año 2009 de la Organización Mundial de la Salud (OMS), aproximadamente 314 millones de personas presentan discapacidad visual en el mundo, debido a enfermedades oculares o a errores de refracción no corregidos. En América Latina y el Caribe, alrededor de dos tercios de la discapacidad visual tiene su origen en afecciones tratables, de los cuales los defectos de refracción representan una parte importante.

La OMS y la Organización Panamericana de la Salud (OPS) estiman que en Latinoamérica el 13% de la población en edad escolar tiene errores refractivos, que cuando no son corregidos pueden causar disminución de la agudeza visual, y constituyen la causa más común de deficiencias visuales. En el Informe de Salud Visual y Ocular elaborado por la Red Epidemiológica Iberoamericana para la Salud Visual y Ocular (REISVO) (Bruis, 2015) entre 2009 y 2010, podemos encontrar información de Argentina, obtenida de ciudadanos atendidos por el Programa de extensión "Salud Visual para

Todos”, en la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP). Así, respecto de la presencia de defectos refractivos, encontramos que el más frecuente es el astigmatismo (alrededor del 60%), luego la hipermetropía (alrededor del 18%) y en último lugar la miopía (entre el 2 y 3 %). La presbicia, que es un defecto relacionado con la pérdida de flexibilidad del cristalino debida a la edad y que dificulta la visión nítida de objetos cercanos, se presentó en el 40% de los atendidos.

Aunque la salud visual es un tema presente en la agenda sanitaria en algunos países, actualmente no se cuenta con un sistema de información que permita identificar la situación en Iberoamérica para poder planificar los servicios de atención en optometría y oftalmología.

Curiosamente, la distribución de los defectos refractivos en el mundo presenta diferencias. Por ejemplo, en China la miopía nuclea el 20% de los defectos refractivos. Diversos estudios mostraron que las características étnicas tienen mucha influencia en el tipo de error refractivo que padece la población. Por lo tanto, es necesario realizar estudios epidemiológicos a nivel local para poder diseñar adecuadamente las políticas en salud visual.

En nuestro país, en 2006 se implementó un Plan Nacional de Salud Ocular y Prevención de la Ceguera, orientado a la prevención de problemas oculares y a garantizar un mejor acceso de los argentinos a la atención oftalmológica.



Ilustra: Mariela Theiller

Cielo de claraboyas. Fragmento de cuento de Silvina Ocampo (2006)

La reja del ascensor tenía flores con cáliz dorado y follajes rizados de hierro negro, donde se enganchan los ojos cuando uno está triste viendo desenvolverse, hipnotizados por las grandes serpientes, los cables del ascensor.

Era la casa de mi tía más vieja adonde me llevaban los sábados de visita. Encima del hall de esa casa con cielo de claraboyas había otra casa misteriosa en donde se veía vivir a través de los vidrios una familia de pies aureolados como santos. Leves sombras subían sobre el resto de los cuerpos dueños de aquellos pies, sombras achatadas como las manos vistas a través del agua de un baño. Había dos pies chiquitos, y tres pares de pies grandes, dos con tacones altos y finos de pasos cortos.

Silvina Ocampo: Poetisa, narradora y traductora argentina (1903-1993). En este texto, la realidad se mira bajo la óptica deformante de un vidrio, algo que podríamos experimentar observando una escena cotidiana a través de un vaso de agua coloreada. Está descrito desde la perspectiva inocente de un niño, en el relato aparece un modelo de visión implícito en la primera frase (ojos que se “enganchan”), así como las múltiples referencias a la refracción (pies aureolados).

Pedacitos de luz: Modelo de partícula

Por 1660, Isaac Newton, conocido sobre todo por su trabajo sobre la atracción gravitatoria, concebía la Tierra como una suma de partículas diminutas. Esta idea no era nueva sino que se debía a los filósofos griegos Demócrito y Platón, quienes proponían una descripción del universo formada a partir de distintas partículas materiales, pequeñas e indivisibles, llamadas átomos. En el caso de la luz, Platón imaginaba que las partículas al viajar a diferentes velocidades formaban los colores. Como la representación de



Ilustra: Agustín Grenno

una Tierra conformada por un conglomerado de partículas funcionaba bien para describir la gravedad, Newton retomó la suposición sobre la luz imaginando que estaba también formada por pequeños corpúsculos que eran proyectados a altísimas velocidades por los objetos luminosos, y que el ojo percibía cuando impactaban sobre él. Más aún, atribuía la percepción de los distintos colores como el impacto de partículas con diferentes tamaños. Con estas suposiciones podía explicar fenómenos como la reflexión y la refracción.

Esta manera de imaginar la luz no era sin embargo la única posible, pero fue durante mucho tiempo la única oficialmente aceptada por la comunidad científica, en parte por el gran prestigio de Newton.

Si bien el modelo corpuscular se abandonó posteriormente (aunque se enseñó óptica con este modelo en Cambridge hasta 1845), a comienzos del siglo XX se volvió a recurrir a él -considerando ahora partículas llamadas fotones- para explicar el efecto fotoeléctrico, entre otros fenómenos.

Actualmente, se acepta que la luz tiene una naturaleza dual: a veces se describe mejor pensándola como si estuviera formada por partículas y otras, como si fuera una onda.

Una idea Nobel: Efecto fotoeléctrico

El Premio Nobel de Física le fue otorgado a Albert Einstein en 1921 por explicar un fenómeno relacionado con la interacción de la luz con la materia, que había sido observado pero no se comprendía: al hacer incidir luz sobre un metal en ciertas condiciones pueden obtenerse electrones de los átomos de la superficie. Gracias a este efecto puede generarse un flujo de electrones (es decir, una corriente eléctrica) iluminando un metal. Las teorías sobre la luz que se consideraban en aquella época no podían dar una respuesta completa. Una particularidad que no podían explicar es que la emisión de electrones no ocurre con luz de cualquier color. En el caso de iluminar el metal con luz infrarroja, el efecto no se produce aunque la iluminación sea muy intensa. En cambio, con una luz violeta, o radiación ultravioleta, aún de tenue intensidad, siempre se consigue una corriente.

En su propuesta para este fenómeno, Einstein incorporó un concepto ideado anteriormente por Max Planck: una representación atómica en la que la energía está cuantizada, es decir, no puede tener cualquier valor, sino algu-

nos específicos. Einstein propuso entonces que la energía es transportada por la luz en forma de partículas especiales: cuantos de energía, llamados fotones. Los fotones no tienen masa, llevan una cantidad de energía que depende del color -frecuencia- de la luz y viajan, precisamente, a la velocidad de la luz. Así, de algún modo, con Einstein vuelve a aparecer en la historia de la luz la descripción de los fenómenos luminosos en término de partículas, aunque estas nuevas partículas son muy diferentes a las “peletitas” de las primeras representaciones. Las ideas de Planck y Einstein se formalizaron en una novedosa teoría destinada a describir el mundo microscópico: la Mecánica Cuántica.

Según esta nueva representación, el efecto fotoeléctrico ocurre cuando un átomo de la superficie del metal que es iluminado aumenta su energía absorbiendo un fotón. Pero un punto clave es que no se trata de un fotón cualquiera, sino que solo puede absorber aquel que le permite pasar de uno a otro de los “estados” energéticos que tiene disponibles, según las distintas distancias posibles al núcleo atómico. Es decir, el átomo absorbe un fotón que le permite pasar a otro de sus valores “permitidos” de mayor energía, con los electrones más alejados del núcleo. Finalmente, se obtiene una corriente eléctrica recolectando estos electrones de la superficie del metal.

De la misma manera, un átomo en un estado muy energético disminuye su energía emitiendo un fotón, cuyas características (su “color”) dependen del cambio en la energía del átomo. Este mecanismo explica, por ejemplo, la emisión de luz desde los átomos que forman el filamento de una lámpara: toman de la corriente eléctrica la energía necesaria para pasar a un estado “permitido”, con mayor energía, para luego emitir fotones en el proceso de desexcitarse.

El resultado del trabajo de Einstein sobre la interacción entre la luz y la materia se aprecia ampliamente en nuestra vida cotidiana: las celdas fotoeléctricas de la iluminación, las cámaras fotográficas digitales, las puertas automáticas, y las celdas solares que proveen de energía a los satélites, son algunos ejemplos.

El merengue del fotón

Por Damián Gulich

Como hemos visto más arriba, la historia del estudio de la luz tiene muchas idas y vueltas hasta llegar a la visión moderna: de las partículas materiales clásicas de Newton a las ondas de Young y Maxwell y de vuelta a “partículas” (pero ahora en el sentido cuántico) con Planck, Compton y Einstein.

La cuantificación de la radiación electromagnética viene de un artículo de Einstein de 1905. Allí se aprovecha la idea de cuantificar la luz y aún se discute sobre el tema. Cada especialización en ciencias entiende algo distinto por el mismo nombre: fotón. Sin embargo, Einstein no se refirió a ello con ese nombre, sino como cuanto de luz (Lichtquant, en alemán).

El término fotón fue introducido en 1926 en una carta a la revista inglesa Nature por Gilbert N. Lewis, teniendo en mente el proceso de interacción de la radiación con la materia. Aquí el contexto es químico, y se lo entiende como energía que está en un átomo y que después sólo existe)por un corto tiempo. El trabajo de Lewis “La conservación de los fotones” hacía hincapié en aspectos que ciertamente no eran los cumplidos por los cuantos de luz de Einstein. Sin embargo, y para el descontento de Lewis, el nombre prendió indiscriminadamente para todo lo que implique luz.

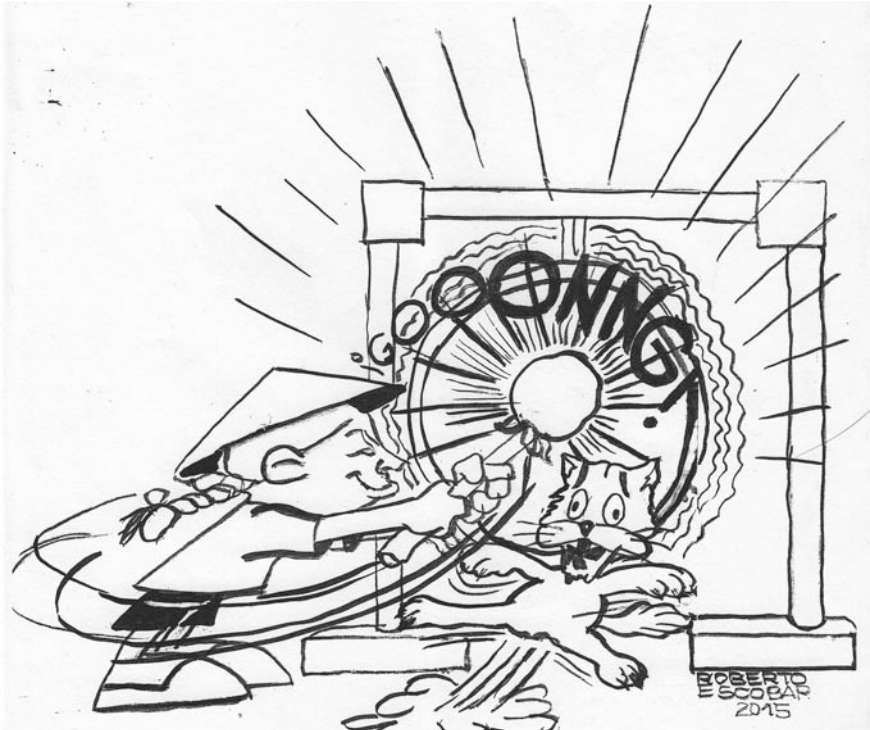
Roy J. Glauber fue Premio Nobel de 2005 “por su contribución a la teoría cuántica de la coherencia óptica”, trabajo que publicó en 1963 y en el que integró la óptica a la teoría cuántica.

Él explicó así las diferencias fundamentales entre fuentes de luz térmicas (bombillas incandescentes, por ejemplo) y las coherentes (láser). El precio que hay que pagar es que la solución de cada problema es totalmente diferente y, en general, es bastante compleja hasta para un caso de luz que se refleja y refracta en una superficie. Aún más: el tratamiento debe tener muy en cuenta qué tanto del universo se considera en el problema; cuál es el tratamiento formal más adecuado; cómo se modelan las fuentes de luz y cómo ellas manejan el sistema; y cómo los detectores de luz se acoplan al mismo. El tema de los detectores no es para nada trivial, pues el cuanto de luz es medido en el cambio de comportamiento del sistema detector, es decir, al interactuar con la materia.

Richard Feynman (1918-1988) fue un reconocido físico estadounidense. Ganó el Premio Nobel de Física en 1965 por su trabajo sobre electrodinámica cuántica. En su juventud trabajó en el proyecto Manhattan sobre la bomba atómica. Cuenta una anécdota relevante respecto de la existencia misma del fotón. Su padre era vendedor de uniformes militares y se las arreglaba para estar informado sobre ciencias.

“Una vez, cuando volví del MIT (había estado allí algunos años) [mi padre] me dijo: “estás bastante educado en estos asuntos; tengo una pregunta que siempre tuve y que nunca entendí muy bien, y que me gustaría hacerte ahora que has estudiado estas cosas”. Le pregunté de qué se trataba y me dijo que entendía que cuando un átomo hace una transición de un estado a otro [más bajo] emite una partícula de luz llamada fotón. “Eso es correcto” le dije. Luego él dijo “bueno, ¿el fotón está en el átomo antes del momento de salir? ¿o no hay ningún fotón para empezar?”. Mi respuesta fue que no hay ningún fotón al empezar la transición. [Él preguntó] “¿y de dónde viene? ¿cómo sale?”. Y le dije (¡por supuesto que no podía contestarle!) que la interpretación es que el número de los fotones no se conservaba y que se creaban por el movimiento de los electrones. No podía tratar de explicárselo; el sonido que estoy haciendo en este momento no estaba en mí, como cuando mi hijo era chico y estaba hablando; de repente dijo, ya no podía decir cierta palabra (la palabra era “gato”) porque su bolsa de las palabras ya no tenía más de la palabra “gato” adentro. No hay bolsa de palabras que uno tenga adentro y que uno vaya gastando a medida que las va sacando; uno las va haciendo mientras las usa. En el mismo sentido, no había una “bolsa de fotones” en el átomo, y cuando los fotones salían no lo hacían de algún lado; pero no lo podía explicar mejor que eso. Él [mi padre] no estuvo satisfecho conmigo en ese tema, y nunca pude explicarle muchas de las cosas que él no entendía [risas]. ¡Sin éxito él me había enviado a todas estas universidades para poder averiguar todas estas cosas que nunca pudo averiguar!”

Horizon – BBC (1981).



Ilustra: Roberto Escobar

¿Qué onda?

Muchos de los fenómenos relacionados con la luz pueden entenderse si se la considera una onda. La luz cumple con algunas de las características más simples del movimiento ondulatorio: se propaga a una velocidad particular (distinta en el espacio vacío que en un vidrio), se refleja al encontrar obstáculos (por ejemplo, los espejos), y su intensidad se puede sumar (prendiendo dos lámparas). Hay otras propiedades que no son tan evidentes: ¿puede la luz rodear objetos como las olas en una laguna pueden rodear un poste? ¿puede la luz sumarse para dar oscuridad? ¿cómo explicamos los distintos colores? Con el modelo ondulatorio podemos construir una explicación apropiada para el caso del fenómeno de interferencia, en que se superponen las ondas originadas por dos fuentes emisoras iguales. En el caso de la luz, las ondas

provenientes de dos fuentes pueden dar como resultado una sucesión de imágenes de luz y sombra alternadas. El otro fenómeno que necesita de las ondas para ser entendido es la difracción: puede verse en el caso de la luz como una sombra difusa que se produce en el borde de una ranura iluminada. Un tercer fenómeno es la polarización, que ocurre sólo en ondas transversales, y que tiene manifestaciones tanto en la naturaleza como en la tecnología.

Para describir la luz y su comportamiento con el modelo ondulatorio es necesario explicitar con cierto detalle qué entendemos por onda. Vamos a llamar onda a una perturbación que se propaga por sí misma en el espacio a medida que transcurre el tiempo, alejándose de la fuente que la emitió con una cierta velocidad, y transportando energía pero no materia. Para que sea posible la existencia de ondas, en general, es necesario que ocurra una perturbación que la genere: una chispa, un golpe en una campana, un terremoto. En muchos casos -aunque no siempre, como veremos- es preciso también un medio que propague la perturbación: el agua, un resorte, el parche de un tambor, una cuerda. Pero volviendo al ejemplo del agua: las olas que se forman en un charco, cuando movemos rítmicamente un pie, no son todas iguales. Podemos hacer que las olas se sucedan unas a otras rápidamente. O podemos dejar pasar más tiempo entre una y la siguiente. Y, si hacemos olas tirando una piedra, dependiendo de la piedra que tiremos, algunas olas serán más bajitas que las otras. Para hablar con precisión y poder distinguir unas olas de otras, necesitamos especificar dos magnitudes. Una de ellas, se refiere a la distancia entre la parte más alta de una ola y la siguiente, y se la llama "longitud de la onda", que además está relacionada con la "frecuencia", que es la cantidad de olas que pasan por segundo por un determinado lugar. La longitud de onda -y su asociada frecuencia- son propias de cada onda. Otra magnitud que necesitamos para caracterizar las ondas es la "altura de la ola", que llamamos amplitud o intensidad. Así, la amplitud de la onda acompañada por la longitud de la onda (o la frecuencia) son dos propiedades que todas las ondas tienen y que nos dan toda la información que necesitamos para poder distinguir las y representarlas, por ejemplo, con un dibujo.

Existen muchos ejemplos de ondas: de sonido, en un resorte, de radio, microondas, etc. Una manera de clasificarlas se basa en las condiciones en que se propagan: si necesitan la presencia de un medio material para generarse y propagarse se las llama ondas mecánicas, mientras que si esto no es necesario, se las llama ondas electromagnéticas.

Las ondas de sonido, las sísmicas, y las olas en el agua, son algunos ejemplos de ondas mecánicas.

Las ondas electromagnéticas, como la luz, las ondas de radio, la radiación ultravioleta, X y gamma, pueden propagarse por algunos medios materiales (por ejemplo la luz viajando por el vidrio o el agua) pero pueden hacerlo también en el espacio vacío: por ejemplo la luz de las estrellas llega hasta nosotros a través del espacio interestelar -vacío- y luego viaja por la atmósfera terrestre hasta la superficie de nuestro planeta.

Ondas en un resorte

Para presentar algunas de las propiedades más importantes de las ondas podemos pensar concretamente en una onda que se forma al perturbar un resorte largo.

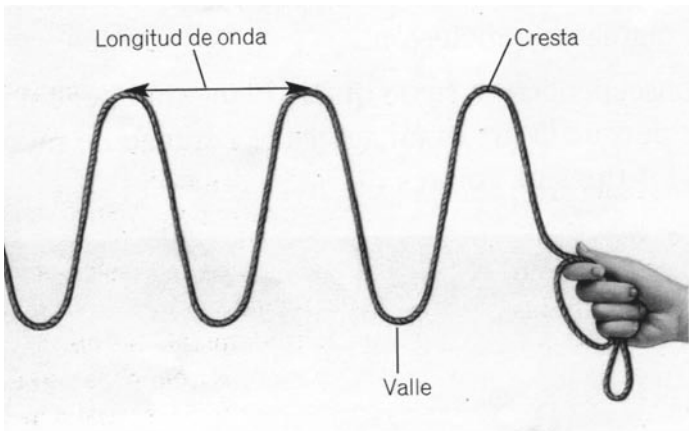
Así, con el resorte estirado sobre una superficie (mesa, piso), podemos tomar un extremo y moverlo una vez hacia la derecha e izquierda rápidamente para generar un pulso y observar su propagación. Si las dimensiones del resorte lo permiten, es posible estimar la magnitud de la velocidad media a la que viaja el pulso (como la distancia entre los puntos de sujeción del resorte dividido el tiempo que tarda el pulso en llegar de uno al otro), notando que es finita. La dirección de la propagación será la que marca el resorte estirado. Si cambiamos la tensión, estirando o aflojando más el resorte, percibiremos un cambio en la magnitud de la velocidad. Si el resorte es suficientemente largo podremos también observar la atenuación en la amplitud de la onda -o pulso- a medida que se propaga.

Para visualizar el concepto de amplitud de la onda, podemos generar ondas y estimar la distancia entre un valle y un pico (o cresta).. Si repetimos la observación pero con una perturbación mayor, por ejemplo, moviéndolo el doble de distancia hacia la derecha e izquierda, veremos que la amplitud cambia.

Es decir, la diferencia entre los picos y los valles está entonces relacionada a la intensidad de la perturbación. Si el resorte es suficientemente largo veremos la atenuación en la amplitud de la onda a medida que se propaga.

Al igual que antes, con el resorte tensado sobre una superficie (mesa, piso), si aumentamos el ritmo de la perturbación veremos que cambia la distancia entre pico y pico en el resorte, es decir, la frecuencia de la onda (o su longitud de onda).

Algunas otras sugerencias para ensayar con resortes pueden encontrarse en el material digital.



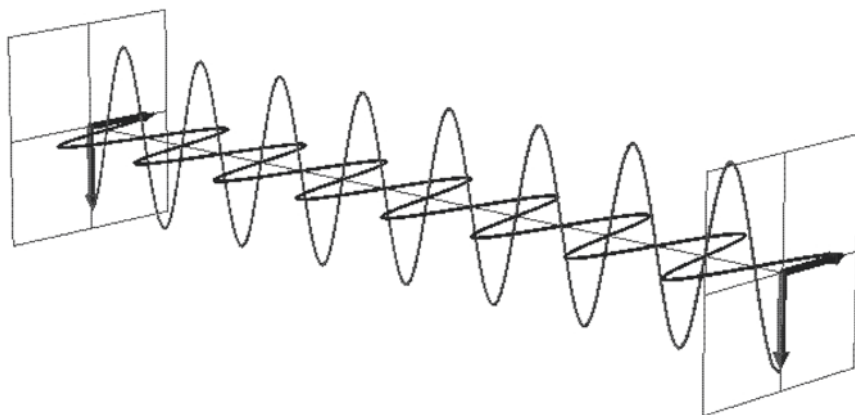
Ondas electromagnéticas

En el caso de la luz, para su descripción no usamos las ondas mecánicas, como las olas o el sonido, aunque como vimos comparte con ellas algunas propiedades. Se usa, en cambio, otro tipo de ondas que tiene un origen muy diferente: ondas electromagnéticas. Para entender el porqué, debemos recurrir a la historia. Después de estudiar la electricidad y el magnetismo, los físicos de mediados de 1800 descubrieron que ambos temas estaban muy relacionados. Es más, mostraron que podían considerarse como dos aspectos del mismo fenómeno, y llamaron “electromagnetismo” a la teoría que lo describe. El que hizo un aporte notable fue el inglés James Clark Maxwell, quien resumió en ecuaciones matemáticas lo apren-

dido hasta el momento. A partir de ellas, conjeturó que los fenómenos electromagnéticos generaban ondas que se movían con la misma velocidad que la luz. Y varios años más tarde verificaron experimentalmente que, en efecto, la luz era producida por cargas eléctricas aceleradas y que, por lo tanto, podía representarse (es decir, modelizarse) como una onda electromagnética que viaja por el espacio.

Cuando acercamos un imán a un trozo de hierro vemos que lo atrae sin necesidad de contacto entre ellos. Como si el espacio que rodea al imán tuviera cualidades especiales, que describimos proponiendo la idea de campo magnético. De la misma manera, cuando frotamos un objeto de plástico para atraer papelitos podemos asociar al espacio que rodea al plástico una magnitud que describe esa fuerza eléctrica actuando a distancia, y que llamamos campo eléctrico. Imaginemos que en una región del espacio existen dos campos, el eléctrico y el magnético, y que ambos oscilan. Es decir, que no mantienen un valor constante, sino que su intensidad (que asociamos a fuerzas eléctrica y magnética) cambia a medida que pasa el tiempo. Imaginemos también que en la dirección de cada campo hay una flecha que señala la dirección de la fuerza (eléctrica o magnética), y que la flecha es más larga cuando el campo es más intenso. Si representamos con una soga la posición de la punta de las flechas, a lo largo del tiempo éstas describirán una forma de senoide como en la última imagen.

Se ha detectado experimentalmente que el campo eléctrico oscila de tal manera que las flechas que lo representan forman siempre 90° con las que representan al campo magnético. Es decir, las ondas electromagnéticas son transversales. Si graficamos la evolución de estas ondas, se dispondrían en dos planos perpendiculares. Supongamos ahora que estos campos oscilantes viajan a través del espacio. Lo harán siempre en la dirección de la línea que forman los planos perpendiculares cuando se cortan entre sí. Es decir, las ondas electromagnéticas se moverán como ondas transversales. Es todo un ejercicio de imaginación, porque no podemos verlos, como no podemos ver los campos cerca del imán y del plástico. Pero estos modelos nos ayudan a pensar en el fenómeno.



Esquema de una onda electromagnética

La generación de estas ondas proviene siempre de cargas eléctricas aceleradas: electrones vibrando. Esto ocurre con los electrones en una antena emisora, en la llama de una vela, en una estrella. Entonces, esos campos eléctricos y magnéticos oscilantes que viajan por el espacio (el aire, el vacío o un medio como el agua), constituyen una onda electromagnética. La frecuencia con que los campos oscilen le va a dar características muy distintas a la onda.

Llamamos espectro electromagnético al conjunto de todas las frecuencias posibles (todos los miembros de esta familia), y veremos que incluye muchas de las ondas conocidas.

Los sentidos de los seres vivos no detectan todas y cada una de las radiaciones. Las personas solo vemos una parte del espectro: la luz visible. Hay animales que ven otras radiaciones: las abejas detectan el ultravioleta y las gallinas, el infrarrojo. Ordenadas de mayor a menor longitud de onda, el espectro de radiación electromagnética se agrupa en:

- Ondas de radio: son las de menor frecuencia y mayor longitud de onda. En las emisoras radiales se generan ondas que se detectan con un aparato de radio. Las ondas de radio y de televisión llevan información de los distintos programas de modo codificado, en un proceso llamado modulación.

Para ello, se superpone la información propia del mensaje que se emite con una onda procedente de la antena emisora. El resultado es una onda en amplitud o frecuencia modulada. Cuando la señal emitida encuentra una antena receptora adecuada, se produce una corriente eléctrica y la señal se decodifica para pasar a un parlante o un aparato de televisión. La longitud de estas ondas ronda la decena de metros.

- **Microondas:** penetran con facilidad en la atmósfera y se las utiliza en comunicaciones por satélites. El horno microondas se basa en que las moléculas de agua contenidas en los alimentos vibran con gran energía cuando inciden microondas sobre ellas. La fricción que se genera entre las moléculas produce la energía que aumenta la temperatura de los alimentos. Los radares también emiten ondas electromagnéticas del orden de las microondas. La longitud de estas ondas tiene un promedio de 10^{-2} de metros.

- **Radiación infrarroja:** Las ondas infrarrojas lejanas (próximas en frecuencia a las microondas) producen una sensación de calor, por ejemplo, el que sentimos provenir del sol, un fuego, o un radiador. Las ondas del infrarrojo cercano (próximas en frecuencia a la luz visible) no producen calor perceptible. Son las que utilizan los controles remotos de TV. La longitud de estas ondas tiene un promedio de 10^{-5} de metros.

- **Radiación visible:** lo que llamamos luz es, en realidad, una pequeña porción del espectro electromagnético. Cada frecuencia de la radiación visible corresponde a un color diferente: la de mayor frecuencia y menor longitud de onda es la violeta y la de menor frecuencia y mayor longitud de onda es la roja. La longitud de onda del visible está entre 10^{-6} y 10^{-7} de metros.

- **Radiación ultravioleta:** El Sol y las estrellas emiten radiación ultravioleta, y la atmósfera de la Tierra filtra una buena parte de la más energética. La longitud de estas ondas tiene un promedio de 10^{-8} de metros.

La radiación infrarroja y la ultravioleta se encuentran, respectivamente, en los extremos del rango de las ondas electromagnéticas que podemos percibir con el sentido de la visión. Aunque de alguna manera nuestro cuerpo las detecta: mediante la sensación de calor o con el cambio en el color de la piel al exponernos al sol. En 1800, el astrónomo alemán Friedrich Herschel registró con un termómetro especialmente sensible

el aumento de temperatura que se produce al iluminar un objeto con radiación del rango visible, y encontró que más allá del rojo, existía una radiación que no podía ver pero su termómetro detectaba: la radiación infrarroja. En el material digital se puede ver una imagen que representa las diferentes temperaturas de un ser vivo. En el caso de la radiación ultravioleta, fue detectada en 1801 por el físico alemán Johan Ritter al encontrar que las ondas “más allá del violeta” podían oscurecer un papel impregnado en sales de plata (como el utilizado en fotografía en blanco y negro), al igual que lo hace la luz visible, e incluso más intensamente.

- **Rayos X:** en forma natural son emitidos por las estrellas, pero no atraviesan la atmósfera. Es por ello que los estudios de estas radiaciones naturales deben hacerse desde el exterior del planeta. En la Tierra se producen por medio de generadores de alta tensión (por ejemplo, acelerando electrones en tubos a baja presión y luego haciéndolos frenar). Se usan para obtener imágenes de la estructura interna de la materia sin destruirla. En medicina se utilizan para observar huesos y órganos del interior del cuerpo, en lo que conocemos como radiografías y tomografías. Sin embargo, los RX, al igual que los Gamma, que veremos a continuación, tienen efectos indeseados sobre los tejidos vivos. En la industria se usan para detectar fisuras y defectos en soldaduras y fundiciones. La longitud de onda de los RX tiene un promedio de 10^{-10} de metros.

- **Rayos Gamma:** son muy penetrantes, y atraviesan la materia con gran facilidad. Solo pueden detenerse con blindajes de varios centímetros de plomo o varios metros de hormigón. Se emiten en reacciones nucleares como las producidas en materiales radioactivos, bombas nucleares y estrellas. Se utilizan en medicina para destruir células cancerosas. La longitud de la radiación gamma tiene un promedio de 10^{-12} de metros.

El mundo. Relato de Eduardo Galeano (1993a)

Un hombre del pueblo de Neguá, en la costa de Colombia, pudo subir al alto cielo. A la vuelta, contó. Dijo que había contemplado, desde allá arriba, la vida humana. Y dijo que somos un mar de fueguitos. -El mundo es eso - reveló - Un montón de gente, un mar de fueguitos. Cada persona brilla con luz propia entre todas las demás. No hay dos fuegos iguales. Hay fuegos grandes y fuegos chicos y fuegos de todos los colores. Hay gente de fuego sereno, que ni se entera del viento, y gente de fuego loco que llena el aire de chispas. Algunos fuegos, fuegos bobos, no alumbran ni queman; pero otros arden la vida con tantas ganas que no se puede mirarlos sin parpadear, y quien se acerca, se enciende.

Eduardo Germán María Hughes Galeano: escritor y periodista uruguayo (1940-2015).

Transparencias

Así como el agua y el acrílico dejan pasar la luz en línea recta, hay otros materiales que no pueden ser atravesados por ella. Los llamamos transparentes y opacos, respectivamente. El modelo de ondas, y lo que vimos sobre la interacción de la luz con la materia (el apartado sobre efecto fotoeléctrico, por ejemplo) puede ayudarnos a imaginar los mecanismos responsables de estas diferencias. Este concepto de transparencia, que tenemos más intuitivamente para la luz, se extiende a las otras ondas electromagnéticas: distintos materiales resultan opacos o transparentes dependiendo de la longitud de la onda que incide sobre ellos. Por ejemplo, la piel y los músculos no son transparentes si hacemos incidir sobre ellos ondas electromagnéticas en el rango de la luz visible, pero sí lo son respecto de ondas electromagnéticas del tipo RX y gamma. La atmósfera terrestre es transparente a la luz y a una parte del infrarrojo, pero resulta opaca a casi todo el intervalo del ultravioleta. La pequeña parte de esta radiación UV para la cual resulta

transparente es la responsable de las quemaduras de sol. Los vidrios, en cambio, son opacos a toda la radiación UV, por lo cual no es posible broncearse detrás de ellos.

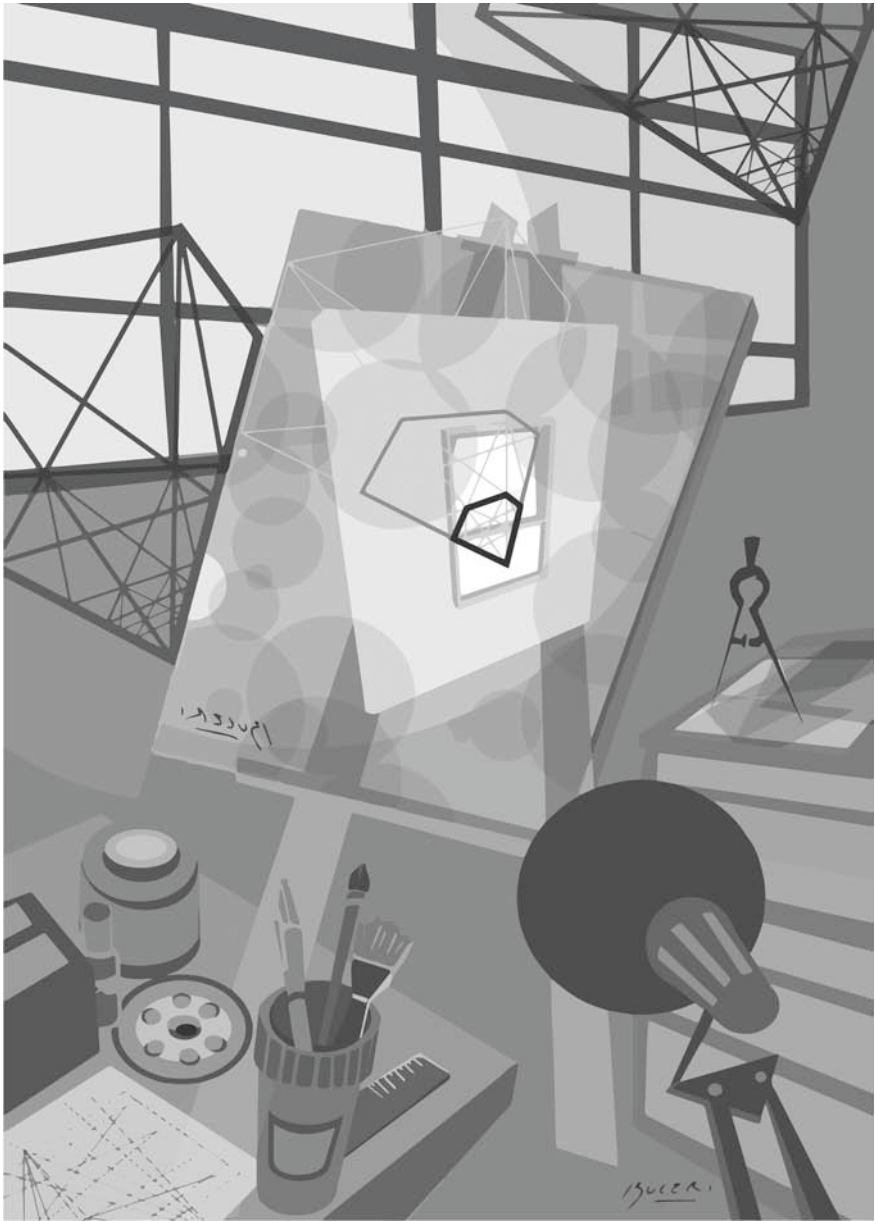
Detrás del vidrio. Fragmento de canción de Vox Dei (1972)

*Las horas se suceden una tras otra,
y yo aquí, detrás del vidrio
camino y me doy vueltas,
me río y creo ser feliz.*

...

*Dos inviernos más ya han pasado
y el vidrio aún está empañado.
Quiero ver qué hay detrás,
es preciso intentar, y entrar, y penetrar
en la realidad, estar en el umbral
no es estar en vida, no, no.*

Vox Dei: Banda argentina de rock formada en 1976, pionera en cantar en castellano. Realizaron un álbum conceptual sobre la Biblia, que generó polémica y hoy se considera una obra de arte muy respetada. En la canción, el vidrio podría simbolizar la incapacidad que tiene el “yo lírico” (la voz del poeta) de sentir plenamente la vida por causa de algún suceso innominado que sucedió hace dos años (“dos inviernos”). El vidrio aún está empañado y el poeta no puede ver plenamente, es decir, lo que sintió todavía está presente. Dejar de estar detrás del vidrio representa “entrar y penetrar la realidad”.



Ilustra: Agustín Bucari

Para hacernos una representación de lo que está ocurriendo entre la onda electromagnética y el material sobre el que incide, resulta útil imaginar la materia como formada por partículas que pueden vibrar en cierto rango de frecuencias. Este rango, a su vez, depende de los elementos químicos particulares que forman la sustancia que estamos considerando (metal, madera, diamante, etc.) y depende también de la manera en que se encuentran ligados entre sí los átomos y moléculas. Así, cada material tiene sus frecuencias “naturales”. Por ejemplo, el grafito y el diamante están compuestos por el mismo elemento químico: el carbono. Sin embargo, la forma en que los átomos de carbono se ligan unos a otros es distinta en cada caso y, por ende, también resulta diferente la transparencia que presentan ante la luz visible.

Las lenguas de diamante. Fragmento, del poema de Juana de Ibarbourou (1998a)

*Yo no quiero que hable. Yo no quiero que hable.
Sobre el silencio éste, ¡qué ofensa la palabra!
¡Oh lengua de ceniza! ¡Oh lengua miserable.
No intentes que ahora el sello de mis labios te abra!
Bajo la luna-cobre, tácturnos amantes,
Con los ojos gimamos, con los ojos hablemos.
Serán nuestras pupilas dos lenguas de diamantes
Movidas por la magia de diálogos supremos.*

Juana de Ibarbourou: Juana Fernández Morales, escritora uruguaya (1895-1979), conocida como Juana de Ibarbourou al casarse y luego como “Juana de América” debido a su enorme popularidad.

En esta poesía, la autora propone la idea de que las palabras habladas rompen el encanto de la comunicación que se entabla entre dos enamorados. Las pupilas son comparadas con diamantes: a través de los ojos es posible ver el sentir del otro, ellos reflejan el amor mejor que las palabras. Así, las palabras son lenguas de ceniza mientras que las miradas son lenguas de diamantes.

Como ya mencionamos, las ondas electromagnéticas son generadas por electrones vibrando. Estas ondas transportan energía, que puede interactuar nuevamente con los electrones de la materia sobre la que incide.

Cuando la luz tiene una frecuencia que está comprendida en el rango de frecuencias naturales del material, entonces los electrones (y los átomos de los cuales forman parte) empiezan a vibrar muy intensamente, pues se produce el fenómeno conocido como resonancia. Los átomos quedan resonando durante un tiempo considerable, durante el cual van cediendo la energía a otros átomos con los que van interactuando hasta que la energía se dispersa uniformemente por el material (que se calienta en este proceso). En este caso, el material es opaco a la luz.

En cambio, si la frecuencia de la luz incidente no está comprendida en el rango de las naturales del material, sino que es algo menor o mayor (como ya mencionamos el vidrio resulta transparente a todas las longitudes del visible, pero no al ultravioleta ni al infrarrojo), las vibraciones de los átomos son menos intensas y duran poco tiempo: el átomo vuelve a emitir un tiempo más tarde la energía que recibió en forma de luz idéntica a la incidente. La luz vuelve a emerger del material, y decimos que es transparente a la luz.

A raíz de este proceso de absorción y emisión, la velocidad de la luz en un medio transparente es menor que en el vacío (en el vidrio es alrededor del 70% y en el diamante, aproximadamente 40% de c).

Diamante. Fragmento de canción de Jorge Fandermole (2005)

*Me han regalado un diamante
y no sé qué hacer con tanta luz;
abro mi mano un instante
y brilla hasta el cielo limpiando el azul.
Es sobre todas las cosas mi piedra preciosa
invisible en su faz y en el envés
transparente su forma latente
se vuelve real.*

Jorge Fandermole: Autor, compositor e intérprete nacido en Santa Fe, Argentina, en 1956. Formó parte de lo que se conoce como Trova Rosarina, un movimiento informal de creación y producción musical. Su obra está ligada al cancionero popular de géneros urbanos y rurales.

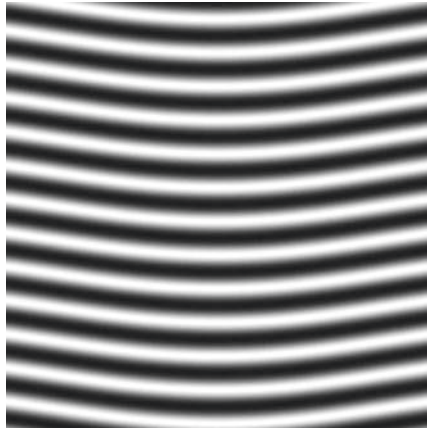
Sumas y restas: Luz que interfiere

Como comentamos brevemente en el capítulo 1, a principios de 1800 la teoría ondulatoria estaba en pleno auge de la mano de Thomas Young, un médico británico quien se abocó al estudio de la luz motivado por entender el funcionamiento del ojo humano. Young, quien fue luego profesor de física, formuló el principio de interferencia y diseñó uno de los más famosos experimentos para verificar sus conclusiones sobre este principio: el experimento de la doble rendija. Según este principio, cuando dos ondas de la misma frecuencia coinciden perfectamente (o casi), el resultado es una superposición de ambas: si coinciden pico con pico y valle con valle, el resultado es una perturbación más intensa y la interferencia es constructiva. Si por el contrario el pico de una no coincide con el valle de la otra, el resultado es la anulación: la interferencia es destructiva.

La interferencia se produce entonces cuando se superponen las ondas provenientes de dos fuentes luminosas y como resultado se perciben imágenes de luz y sombra alternadas (según cómo sea el desfase o corrimiento

entre los campos electromagnéticos provenientes de cada fuente, como enuncia el Principio de Interferencia). La rápida variación de la emisión de luz hace que este fenómeno no pueda ser observado en luces comunes y corrientes, salvo en el caso en que ambas luces sean coherentes, es decir, que el desfase (corrimiento) entre los campos de ambas se mantenga constante. De otro modo, su cambio es tan rápido que no es posible observarlo. En experimentos de interferencias conviene usar luz de láser, que es emitida en forma coherente y su haz no se dispersa como en otras fuentes de luz. Si a la luz láser se la hace incidir sobre una pantalla opaca en la que se practicaron dos agujeros pequeños, de un tamaño levemente mayor que el haz de luz, entonces tendremos dos fuentes de luz coherente. La imagen de estos orificios puede verse del otro lado, como se indica en las experiencias sugeridas en el material digital, con otra pantalla.

Y la imagen que se observa como resultado no es una iluminación continua sino una sucesión de luces y sombras, conocido como “patrón de interferencia”. Los sectores iluminados se deberán a un máximo de intensidad del campo eléctrico, mientras que en las regiones en sombra el campo eléctrico será cero. ¿Cómo explicar este fenómeno? Para hacerlo debemos imaginar la luz que sale de cada agujero iluminado como una sucesión de ondas electromagnéticas, con máximos y mínimos de campo eléctrico y magnético que se van propagando en el espacio. Como dijimos, la mayor intensidad de la luz está relacionada con los máximos del campo eléctrico (interferencia constructiva), y la oscuridad con los mínimos (interferencia destructiva). Como varían tan rápidamente (en el caso del láser, unas 3 billones de veces por segundo), nuestro cerebro lo percibe como una iluminación continua. Sin embargo, habrá lugares de la pantalla a los que las ondas provenientes de ambos agujeros “emisores” lleguen con un desfase tal que la onda compuesta por ambas contribuciones tenga siempre un máximo (o siempre un mínimo) de intensidad. Así, en cada lugar de la pantalla habrá un campo eléctrico oscilante, suma de dos campos, pero de tal manera que en algunos casos esta adición producirá luz y, en otros, oscuridad. Este efecto depende de la frecuencia de la luz, así como del tamaño de las rendijas por las que pasa y de la separación entre las mismas. Por eso mismo, es interesante realizar experiencias que permitan variar esos valores.



Ejemplo de un patrón de interferencia.

Creative Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Anillos_de_Interferencia.JPG?uselang=es#file.

Por aquí y por allá: Difracción

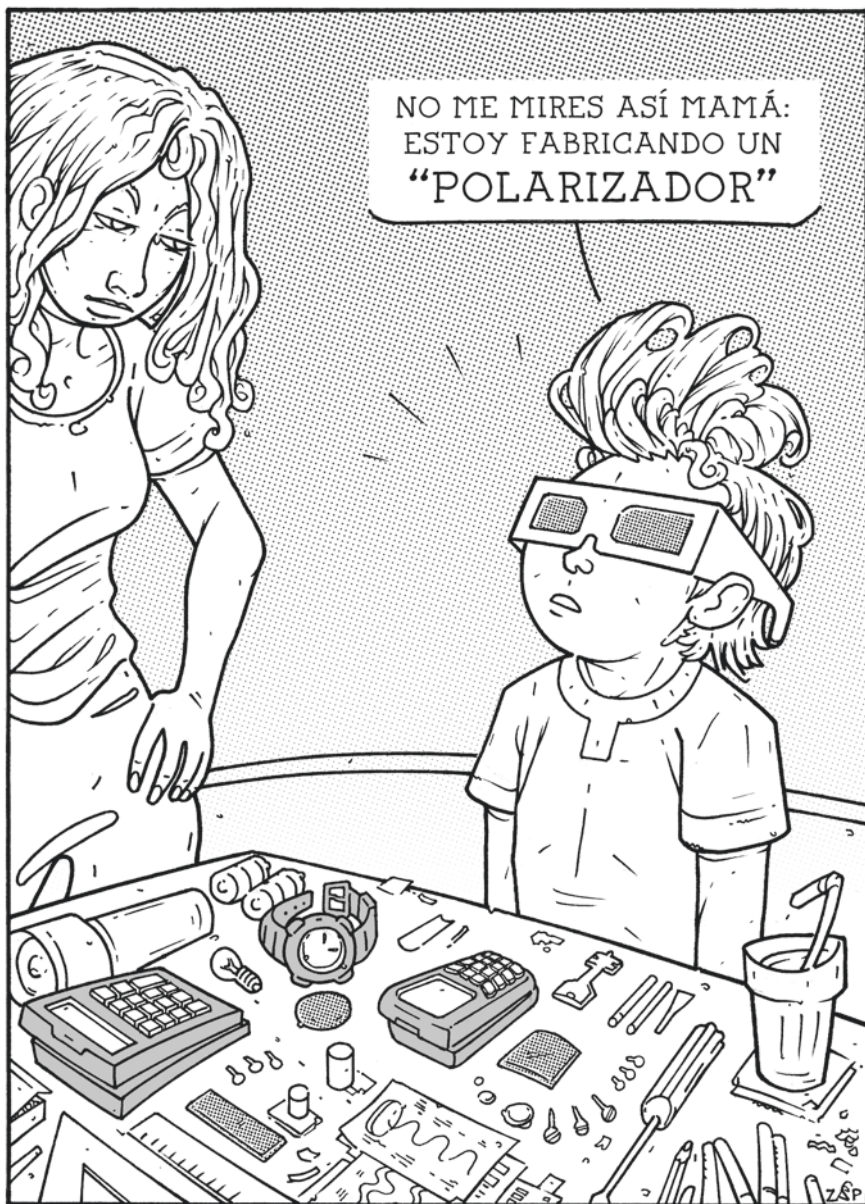
La difracción es un fenómeno de características similares al de la interferencia, y puede verse en la sombra difusa que hace la luz en un borde filoso, o una ranura angosta (de un ancho similar al de la longitud de onda de la luz incidente). Lo podemos pensar como consecuencia de la interferencia de la luz proveniente de distintos puntos de la rendija.

Similarmente, si en lugar de una ranura interponemos en el recorrido del haz de luz un obstáculo de dimensiones parecidas a la longitud de onda de la luz, también aparece difracción. Es más fácil de observar con un láser y hace falta un montaje bastante sutil para poder apreciarlo, como se muestra en las experiencias sugeridas en el material digital.



Experimento de difracción. Un láser atraviesa una red de difracción y genera un patrón de luces y sombras alternadas en la pantalla.

Según el modelo de ondas, este fenómeno puede abordarse suponiendo que el haz de luz que pasa por la ranura está compuesto por pequeñas fuentes puntuales, cada una de las cuales interfiere con las otras. Así, en la pantalla aparecerán lugares de “interferencia constructiva”, de luz intensa, y otros de “interferencia destructiva”, que son oscuros. Este patrón de difracción tendrá una separación entre las franjas brillantes y oscuras que depende del tamaño de la ranura y de las características de la luz. Esta propiedad se utiliza para medir distancias muy pequeñas (como el ancho de la rendija) que serían imposibles de realizar con otros sistemas. Por ejemplo, se puede determinar la separación entre los átomos en un cristal iluminándolos con luz de una frecuencia conocida (por ejemplo rayos X), y midiendo la separación de líneas del espectro. Además, las luces de diferentes longitudes de onda (o frecuencias) tienen sus patrones de difracción corridos unos respecto de otros. Si en lugar de una ranura tenemos muchas, estos efectos son más visibles, y de hecho se construyen “redes de difracción”, consistentes en una sucesión de rendijas contiguas (del orden de diez mil cada veinticinco milímetros). Como el desvío de las ondas producido por la red es diferente para cada frecuencia, al iluminarlas con ondas compuestas, las redes “separan” las imágenes correspondientes a cada frecuencia presente en la luz. Los fenómenos de interferencia y difracción son propios de todas las ondas electromagnéticas y no sólo de la luz, pero en las otras regiones del espectro no son observables con la vista, por lo que son poco conocidos.



Ilustra: Roberto Pérez Escalá

Luz que se orienta: Polarización

Como vimos, la luz es una onda transversal. Es decir, el campo eléctrico y el magnético, que oscilan en planos perpendiculares entre sí, se propagan a su vez en un plano perpendicular a la dirección en la que viaja la onda. Mencionamos también que estas ondas son generadas por cargas eléctricas aceleradas. Cuando estas aceleraciones ocurren siempre en una misma dirección -supongamos que sea una aceleración vertical-, la onda electromagnética resultante estará polarizada: vibrará en esa misma dirección –en este caso, un plano vertical-. Si las aceleraciones de las cargas eléctricas no tienen una dirección preferencial, tendremos ondas polarizadas en todas las direcciones posibles o, lo que es lo mismo, sin polarizar.

Además, independientemente de las fuentes que la generaron, es posible obtener luz polarizada a partir de luz que no lo esté. Si logramos construir un dispositivo que deje pasar solo la componente que vibre en una dirección determinada (por ejemplo horizontal) obtendríamos luz polarizada. A estos dispositivos se los llama “polarizadores”.

En el caso de la luz, nuestros ojos no pueden percibir ninguna diferencia entre distintas polarizaciones. Sin embargo, podemos comprender mejor este fenómeno con una cuerda o resorte y un marco angosto de madera (de ancho comparable al espesor de la cuerda). Si generamos una onda circular en la cuerda, es decir, que vibre en el plano vertical y horizontal, y la hacemos atravesar el marco, veremos que del otro lado la cuerda sólo vibra en uno de los dos planos, horizontal o vertical, según la manera en que coloquemos el marco que funciona como un polarizador.

Continuando con la analogía de la cuerda y el marco de madera, en el caso de las ondas electromagnéticas existen también polarizadores que, cuando los interponemos, sólo dejan pasar luz en una determinada dirección. Los polarizadores tienen un eje de polarización definido, de modo que si interponemos en el camino de la luz dos de ellos con ejes cruzados (por ejemplo, uno vertical y otro horizontal), bloquearemos por completo la propagación.

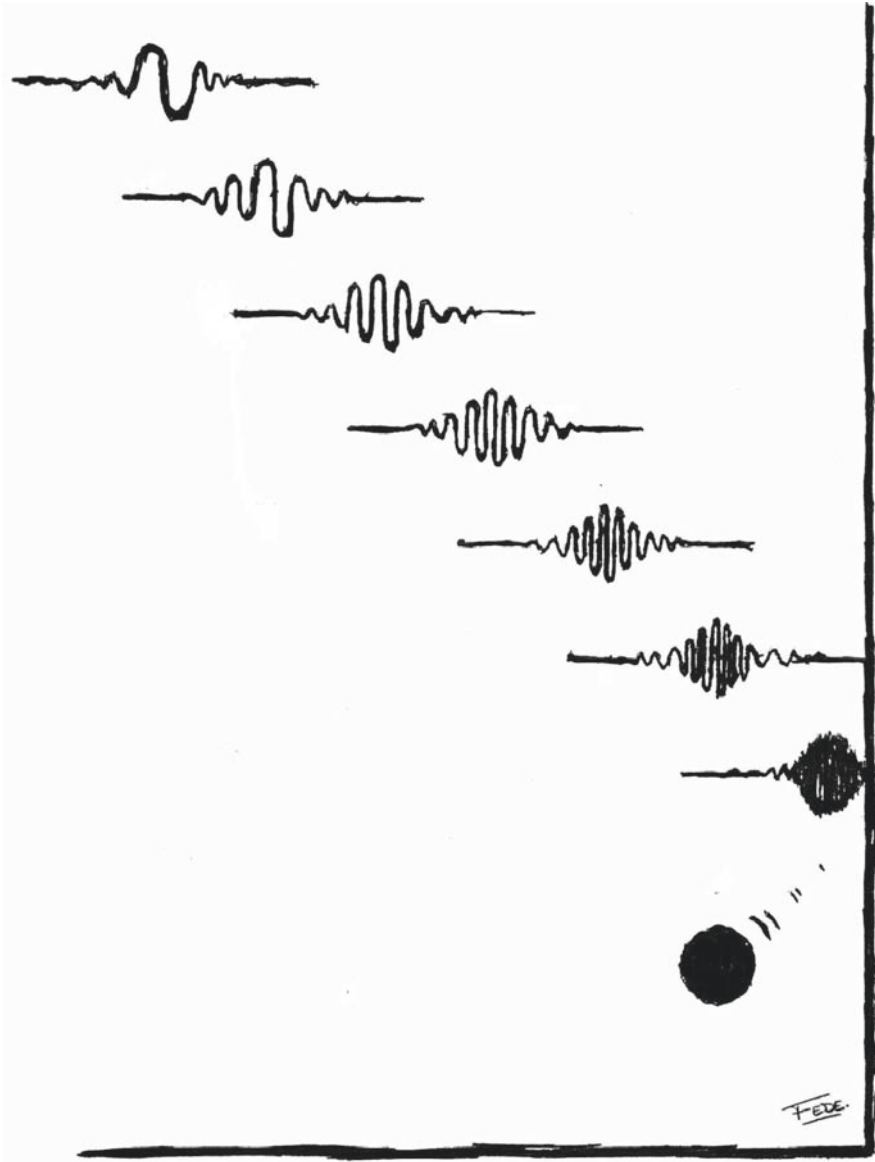
Polaroid de locura ordinaria. Fragmento de canción de Fito Páez (1988)

*Bajó por el callejón
en donde estaba él
después vomitó ese ron
manchando la pared
El sol le caía bien
entrando en la avenida.
Su vida no era más su vida
pero eso estaba okey.*

Fito Páez: compositor, cantautor, y pianista, nacido en Rosario en 1963, y gran exponente del rock argentino

El título de la canción hace referencia a la marca Polaroid, fundada en 1935 por el científico estadounidense Edwin Lang, a partir de su laboratorio de óptica. Lang fue el creador del primer polarizador sintético, de la teoría Retinex sobre el color, que comentaremos posteriormente, y también, en 1947, de la cámara fotográfica instantánea, que ofrecía en papel una imagen fotográfica ya revelada en 60 segundos. Polaroid es usado aquí como sinónimo de fotografía instantánea, y la temática del poema está relacionada con el cuento de Charles Bukowski titulado “La chica más guapa de la ciudad”.

Puede conseguirse un polarizador desarmando la pantalla de una computadora o teléfono viejo. O bien, se puede usar el cristal de anteojos polarizados (no todos los anteojos de sol son polarizados; usualmente lo son los especiales para la nieve). En el Material Digital proponemos algunas experiencias.



Ilustra: Federica Rampf

¿En qué quedamos: onda o partícula?

Hemos visto hasta aquí que el desafío de describir la luz a través de algún modelo apropiado no fue -no es- tarea sencilla, por la naturaleza tan especial de la luz. Hasta ahora existen dos modelos, y se recurre a uno u otro según las características de aquello que se pretende estudiar. Vimos que el modelo de ondas es necesario para explicar fenómenos como difracción, interferencia y polarización. Pero a la hora de entender la interacción de la luz con la materia el modelo de partículas es el más apropiado. Esta coexistencia de dos modelos complementarios -que fue causa de largas discusiones entre los físicos- es llamada dualidad onda-partícula.

Una observación: al mirar el índice de este libro pareciera haber un tercer modelo, el de rayos, que describe la óptica geométrica y sirve para abordar la reflexión y la transmisión de luz.

Sin embargo, podría pensarse a estos rayos como las trayectorias de partículas que se mueven en línea recta a la velocidad de la luz, o bien como líneas que apuntan en la dirección en que se mueven las ondas. De hecho, puede reescribirse la óptica geométrica en términos ondulatorios.

Esta naturaleza dual de la luz inspiró una teoría puramente especulativa propuesta por un joven físico francés: Luis Víctor de Broglie (1892-1987).

Él se preguntó si, así como la luz puede ser onda y partícula, las partículas “comunes y corrientes” como los electrones y protones podrían tener también un aspecto ondulatorio. Detrás de ese argumento está la noción de simetría, tan abundante en la naturaleza y tan valorada por los físicos.

La atrevida teoría elaborada por de Broglie pronto dio origen a diversas experiencias que intentaban probar si tenía algún fundamento. Se encararon experimentos similares a los que muestran el carácter ondulatorio de la luz: se interpone a la onda un objeto -o una ranura- para lograr difracción e interferencia. En este caso, fue necesario apelar a objetos y ranuras de tamaños mucho menores que los usados para la luz porque, según la nueva teoría, la longitud de onda que le corresponde a un electrón, por ejemplo, es del tamaño de un átomo. Ante la imposibilidad en aquellos tiempos de manipular la materia a nivel atómico (hoy posible) para construir una red o rendija de ese tamaño, se eligió usar como rejilla los átomos que forman un cristal -y otros dispositivos más sofisticados- como barreras para deformar la onda. Los resultados apoyaron la hipótesis de dualidad onda-partícula, y de allí a desarrollar aplicaciones tecnológicas pasaron pocos años. El mi-

croscopio electrónico y la nanotecnología son ejemplos contundentes de que las cosas funcionan como si la materia tuviera también una naturaleza dual. Por qué es así, no lo sabemos.

Sólo podemos decir que la Mecánica Cuántica, que es la teoría que los describe, pese a ir contra el sentido común, es la más exitosa que jamás haya sido propuesta.



Ilustra: Ró Barragán

Capítulo 3

Percepción

La visión

“Y fue tanta la inmensidad de la mar, y tanto su fulgor, que el niño quedó mudo de hermosura. Y cuando por fin consiguió hablar, temblando, tartamudeando, pidió a su padre: -Ayúdame a mirar-” (Galeano, 1993).

El ojo ha sido utilizado en la cultura como símbolo de una visión que trasciende a la función biológica: la visión divina, simbolizada con el ojo de Dios, o la visión mística, con el tercer ojo, son algunos ejemplos. Los ojos también parecen hablar en silencio de lo que somos y sentimos, y guardan celosamente nuestros secretos.

En física, el ojo humano puede ser descrito como un complejo instrumento óptico. En la parte anterior tiene una lente biológica biconvexa (o convergente) llamada cristalino, que hace foco en la pared posterior del ojo, la retina. Esta última es una estructura compleja que funciona como una pantalla receptora y está formada por distintos tipos de células nerviosas que son sensibles a la luz y se las denomina fotorreceptoras.

Hay dos tipos: los conos y los bastones, que son las células que se especializan en traducir las señales luminosas que llegan desde el exterior en corrientes eléctricas. Estas corrientes se envían a la corteza visual a través del nervio óptico y allí se interpretan como una imagen. La distinción entre conos y bastones es funcional: mientras los bastones son sensibles a la intensidad de la luz y a los movimientos, los conos son quienes distinguen los distintos colores. A su vez, los conos pueden tener tres tipos de proteínas que los hacen más sensibles a un determinado rango de longitudes de onda: más del 60% son sensibles al rango de rojo-naranja; alrededor del 30% son sensibles al verde-amarillo; y el resto -aproximadamente el 5%-

al rango violeta-azul. Probablemente por este motivo nos llame mucho más la atención el color rojo que los demás².

De todos modos, la visión como sentido, tal como la experimentamos al mirar nuestro entorno, es un fenómeno que comienza por los ojos pero se completa en el cerebro, el cual compone e interpreta las imágenes.

La luz en el arte. Un ejemplo: el arte cinético

Por Federica Rampf

El Arte Cinético es una forma de arte cuyo nombre deriva de la Cinemática (Del griego kineo, movimiento), una rama de la física que estudia el movimiento de los cuerpos sin considerar las interacciones que lo originan.

En el Arte Cinético las obras tienen movimiento. Puede ser real gracias a partes móviles que son accionadas por fuerzas naturales, como el viento o el agua; fuerzas artificiales, como un motor; o el observador mismo. El movimiento puede ser aparente cuando es percibido sólo en ciertos ángulos o secciones de la obra; o puede ser virtual gracias a ilusiones ópticas. En este caso, esta forma de arte se ha independizado como Arte Óptico. Pero en todos estos casos, las obras buscan la participación del espectador, obligándolo a interactuar, ya sea moviéndola, moviéndose o interpretándola.

El Arte Cinético tiene sus orígenes a finales del siglo XIX, cuando artistas impresionistas experimentaron con acentuar el movimiento de figuras humanas en sus obras. En el Arte Abstracto del siglo XX se experimentó con la translación estática, donde se representan las distintas etapas de un movimiento, cadencias de colores o formas geométricas, representando cierta vibración o ritmo en la obra. O, simplemente, experimentando en la forma de aplicar la pintura: arrojando, salpicando, vertiendo, goteando o moviéndose el artista alrededor de la obra. Se intenta así expresar,

2 Esto vale para el ojo humano. Los animales perciben el mundo de manera muy diferente. Los perros, gatos y otros mamíferos, por ejemplo, ven en tonos amarillos y azules. Las aves cuentan con 6 tipos distintos de fotorreceptores y las abejas ven todos los colores menos el rojo, pero pueden ver el ultravioleta. Los langostinos tienen 12 tipos de fotorreceptores distintos y pueden ver en infrarrojo y ultravioleta, y distinguir también la polarización de la luz. Referencia: La ciencia del color, Ana von Rebeur. Ed. Siglo Veintiuno (ver Bibliografía de consulta)

mediante el color y la materia del cuadro, sensaciones tales como el movimiento, la velocidad y la energía.

Hoy en día el Arte Cinético se refiere a esculturas en las que el espectador tiene el control de su movimiento, diferenciándolas de los móviles.

Las primeras obras aparecieron en Europa en 1910. En 1955 se hizo la primera exposición de Arte Cinético en París, donde inmediatamente se destacaron los artistas argentinos. A partir de 1960, comienza la expansión y el éxito mediante exposiciones y premios de artistas argentinos cinéticos y ópticos.

Sin duda, el artista argentino Julio Le Parc es la principal figura del Arte Cinético mundial. Él ha utilizado elementos que sorprenden o sugestionan la mirada: espejos, lentes distorsionadores, bolas que ruedan por complicados laberintos, efectos de luz y movimiento a través de dispositivos ocultos.

El ojo, el arte, la luz. La obra de Le Parc

Por Marcela Andruchow

Julio Le Parc (Mendoza, 1928) es un pintor y escultor argentino que experimentó y produjo obras en la tendencia del arte luminocinético. Actualmente vive y trabaja en París. En 1959 recibió una beca del gobierno francés y viajó a París. Allí fundó con otros artistas el Centre de Recherche d'Art Visuel (CRAV), desde el que propuso "una ruptura con la tradición artística, alejándose de la obra pictórica estática y acercándose a una concepción dinámica, y con ello, al movimiento constante, que impide la observación estática de la obra". Esto entrañaba una propuesta política que consistía en eliminar la dependencia, la pasividad del espectador. La pretensión de Le Parc era que el visitante saliera de sus exposiciones con la sensación de haber sido parte de una experiencia dada por los componentes de sus obras: las luces, el movimiento, la participación, el juego, los requerimientos hacia él de una obra que provoca cambios. Eso impide que se imponga al visitante una manera de ver las cosas y que las interpretaciones de cada uno puedan ser diferentes.

Además, la subjetividad de la recepción, que cada persona pone en juego en la observación, provoca que vea "cosas que yo [Le Parc] nunca me imaginé que se podían ver en una obra, y me parece muy bien." Las obras del artista, con sus juegos de luces, modifican, recrean y disuelven el espacio,

incluyendo al observador en una obra total. La materialidad de sus máquinas lumínicas se transforma sutilmente en inmaterial. Los efectos casuales de los fenómenos lumínicos observados que generan sus obras son creados por el artista, a través de superposiciones y constelaciones específicas. La resultante aleatoriedad de estos fenómenos se reorienta siempre a nuevas y sorprendentes situaciones que nunca son abarcables en su completitud. La experiencia que se transita en esos juegos lumínicos efímeros lleva a reflexionar sobre lo inconstante y fallido de la realidad, y sobre el fluir de la vida con sus múltiples refracciones y reflejos. Este trabajo artístico de Le Parc no surgió de una intencionalidad objetiva sino que el “movimiento era la solución ideal para ciertos problemas que yo me iba planteando y veía que la luz podía darme una solución y al mismo tiempo permitirme seguir en mi búsqueda”. Las inquietudes del artista y el CRAV, siempre relacionadas con transformar la relación de la gente con el arte contemporáneo, estaban ligadas a la propia vida contemporánea pero ello no los condujo a usar nuevas tecnologías. Cuando aparecieron los nuevos medios como la luz láser o los grandes aparatos electrónicos, Le Parc nunca los utilizó. El grupo consideraba lo artístico como una experiencia estrictamente visual, situada en el plano de una percepción fisiológica y no emotiva. El motivo central para concentrarse en la fisiología del ojo humano como punto de partida fue que la biología es igualitaria, ya que el papel desempeñado por el ojo es común a todos. Entendían que un arte desprovisto de toda emoción o simbolismo da a todos los ojos la misma sensación. Pero a diferencia de la obra de arte estática, las propuestas artísticas del grupo implicaban estar atentos a los cambios visuales que tienen lugar durante el tiempo en que transcurre la experiencia óptica.

Utilizaron el término “inestabilidad” para referirse al efecto en la recepción visual de elementos difíciles de controlar, donde el significado de la obra se diluye en un conglomerado de fenómenos visuales y sensuales provocados por la luz y el movimiento. Las experiencias de Le Parc, como dijimos, estuvieron orientadas a la idea de alejarse completamente de la obra fija, estable y definitiva. A través de estas experiencias de obras con variadas posibilidades de cambios en el tiempo, que solo fueran el resultado de la interrelación de elementos de modo más o menos complejo y no de la mano inspirada o “genial” del artista, podrían ser un medio para destruir las concepciones asentadas respecto del arte, su desarrollo, su espectáculo y su percepción. La experimentación del artista comenzó en 1959 y continuó

durante los sesenta, estudiando y conociendo diversidad de materiales, y atendiendo a numerosos problemas que se le planteaban.

Experimentó con bombillas, luz rasante, rayos de luz artificial, rayos luminosos en el espacio, en agua y en suspensión gaseosa, y muchos otros elementos. Hacia 1963 generaron con el CRAV la noción de “laberinto”, la conformación de espacios asociados a elementos reflectantes, que el espectador tenía que atravesar, transitar, sumergido en el centro de los fenómenos visuales provocados por la experiencia artística. La percepción del observador no era completa y global como con una obra acotada sino que “se le solicitaba simultáneamente desde todas partes: la imagen que percibía durante su recorrido era el resultado del tiempo que pasaba en ese espacio, de sus propios movimientos, de las imágenes que iban produciéndose sucesivamente, etc.”. De la variedad de experiencias que transitó Le Parc surge una clasificación intrínseca de su obra que permite ordenarla en “móviles”, “obturadores”, “materiales impulsados mecánicamente” y “lámparas móviles”. En el material digital se pueden encontrar algunas reseñas sobre el uso de la luz en artistas plásticos argentinos.

Tercera dimensión

Nuestros ojos funcionan igual y cumplen la misma función. Entonces, ¿Para qué necesitamos los dos? La percepción de la misma imagen con dos ojos es lo que nos permite evaluar la profundidad de las figuras y el espacio. Esto se debe a que cada ojo proyecta en la retina una imagen de lo que vemos que es ligeramente diferente de la otra. El derecho ve más detalles del lado derecho, y el izquierdo, del izquierdo. Los seres humanos percibimos la profundidad gracias a la fusión que realiza nuestro cerebro de estas dos imágenes casi iguales, una percibida por el ojo derecho y otra por el izquierdo, de forma separada. Sin embargo, esta información no es usada de modo simétrico. En general, uno de los ojos es “dominante” en el proceso de visión: el cerebro privilegia la información que llega de uno de ellos³. La información del otro es utilizada por el cerebro para generar la sensación de profundidad.

3

Para identificar el ojo dominante, buscar la actividad propuesta en el Material Digital.

Así, con los dos ojos abiertos podemos percibir la tridimensionalidad de un objeto.

En el caso de un dibujo plano, la sensación de tridimensionalidad, o profundidad, se logra con lo que llamamos perspectiva: la proporción relativa de tamaños que nos da una referencia de la distancia al observador.

Una vez incorporada a nuestra experiencia, la perspectiva nos ayuda a interpretar el mundo que nos rodea: forma parte de nuestro código gráfico.

De este modo, nuestro cerebro interpreta lo que los ojos ven. Si una persona ciega de nacimiento pudiera ver se encontraría con dificultades para calcular las distancias, porque es la experiencia la que nos permite construir el criterio para situar los objetos en el espacio.

Las imágenes para visión 3D pueden imitar el efecto que logran ambos ojos a partir de una superposición de dos imágenes planas levemente distintas, tomadas desde ángulos ligeramente diferentes. Por ejemplo, puede lograrse una visión con profundidad usando dos fotografías tomadas desde puntos separados unos pocos centímetros entre sí (como la distancia que existe entre nuestros ojos). Para construir el efecto de profundidad o relieve, es necesario que el ojo derecho registre solamente la imagen que correspondería al ojo derecho y el izquierdo registre la imagen que corresponde al ojo izquierdo. Un método para lograr esto es superponer ambas imágenes pero impresas en distintos colores, por ejemplo, una en tonos rojos y la otra azules y, para visualizarlas, utilizar anteojos con filtros en cada ojo (uno rojo y el otro azul en nuestro ejemplo). Esto hace que un ojo sólo vea la imagen en tonos rojos y bloquee la visión de la imagen en tonos azules, y viceversa. Así, el cerebro “suma” o compone estas imágenes y las interpreta como una figura tridimensional.

Para la proyección de las películas tridimensionales que pasan actualmente en el cine, además de las consideraciones anteriores, las filmaciones se proyectan a través de polarizadores con los ejes de polarización en direcciones distintas. Si miramos una proyección 3D a simple vista veremos las imágenes borrosas. Para verlas en tres dimensiones, el espectador debe utilizar anteojos que polarizan la luz que llega a cada ojo con un eje distinto. Al estar las dos imágenes superpuestas polarizadas en distinta dirección, cada ojo percibe una de las dos filmaciones, como ocurre en la visión real. El cerebro luego interpreta estas dos imágenes construyendo una sola, con sensación de profundidad.

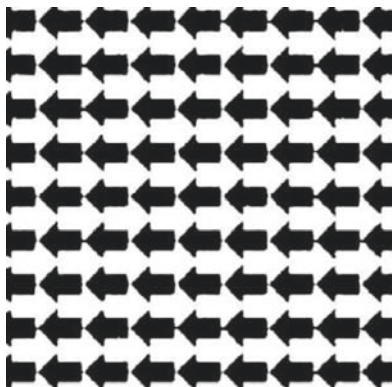
No todo es lo que parece

Como hemos mencionado, es nuestro cerebro el que realiza la interpretación, asignando un sentido a lo que los ojos ven. Por eso nos sorprenden las ilusiones ópticas, pues nos generan contradicciones entre lo que vemos y lo que nos parece ver.

Hay numerosos ejemplos de ilusiones ópticas, y también numerosos efectos que las generan. Mencionaremos brevemente algunos.

Ciertas ilusiones ópticas se deben a la “competencia” entre los dos hemisferios de nuestro cerebro. Aunque están interconectados, el derecho es el que procesa las imágenes del ojo izquierdo, y viceversa. Ambos hemisferios se van especializando en sus funciones a medida que crecemos y aprendemos nuevas capacidades. A partir del estudio de personas que habían sufrido lesiones en uno u otro hemisferio, se avanzó en el conocimiento del funcionamiento del cerebro: ambos hemisferios desarrollan diferentes modos de “pensar”, realizando procesos mentales complejos que se complementan.

Como en el siguiente ejemplo, donde se ven flechas blancas o negras según el hemisferio que “gane” la competencia.



¿Qué muestra la imagen? ¿Flechas blancas o negras?

Ciertos tipos de ilusiones ópticas nos sorprenden porque intentan engañar la experiencia que nos permite asignar distancias: son imágenes donde se mezclan distintos tamaños y perspectivas para mostrarnos situaciones imposibles⁴.

Otra causa de ilusiones ópticas radica en que nuestros ojos aprecian como diferentes aquellas imágenes que percibimos separadas al menos un décimo de segundo. Si una sucesión es más rápida, entonces vemos las imágenes superpuestas: es el principio del cine. Una ilusión de este tipo es aquella en que en un momento las ruedas de un carro o las aspas de un ventilador parecen marchar al revés como si fueran para atrás. En el material digital sugerimos algunas otras.

Espectro de luz

La luz dispersada por un prisma se divide en bandas continuas de colores que van desde el rojo al violeta, como en el arcoíris. Newton bautizó esta configuración como espectro. Si bien el espectro visible es un degradé continuo, suele hablarse de siete colores bien diferenciados: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, añil (azul violáceo) y violeta.

Newton suponía que había alguna relación especial que establecía que fueran siete las notas de la escala musical, los días de la semana y los planetas del sistema solar conocidos hasta ese entonces, y por ese motivo eligió visualizar el espectro como si estuviera formado por siete colores.

Así como la longitud de onda de los sonidos que percibimos nos da la sensación de la cualidad que conocemos como altura (nota musical), la longitud de onda de la luz que percibimos nos da la sensación de color. Si recibimos simultáneamente dos sonidos con alturas diferentes, nuestro sentido del oído puede distinguir ambas notas. Sin embargo, curiosamente, si superponemos luces provenientes de varias linternas con filtros distintos, el color resultante será una mezcla donde no podremos distinguir las componentes.

4 Por ejemplo, las conocidas imágenes creadas por el artista holandés M. C. Escher: cascadas imposibles, escalinatas que ni suben ni bajan...

Puede conseguirse un amplio rango cromático superponiendo luz de tres colores cualesquiera: por ejemplo, el trío rojo, verde y azul (RGB, por sus iniciales en inglés) usado por los televisores y pantallas, o el cyan, magenta y amarillo, que usan las impresoras. Sin embargo, no es posible mediante ninguna combinación de solo tres colores construir todos los demás que podemos percibir los seres humanos.

Newton y la luz

El primer trabajo publicado de Isaac Newton con sus ideas y experimentos sobre la luz apareció en el número del 19 de febrero de 1672 de las *Philosophical Transactions of the Royal Society*.

Newton, por aquel entonces profesor de matemáticas en la Universidad de Cambridge, acompañó el manuscrito con una carta para el editor de la *Royal Society*, que transcribimos aquí. En cursiva, el texto original, y, entre corchetes, agregados para facilitar la lectura (de Azúa, 2000).

Señor,

Para cumplir la última promesa que le hice, le haré saber sin más trámite que durante el comienzo del año 1666 (cuando me dedicaba al pulido de vidrios ópticos no esféricos), me procuré un prisma de vidrio triangular, para probar con él los famosos fenómenos de los colores. Y habiendo para eso oscurecido mi cuarto y efectuado un pequeño orificio en el postigo de la ventana para dejar pasar una cantidad conveniente de luz de sol, coloqué mi prisma en la entrada [del orificio], de tal modo que [la luz] pudiera ser refractada hacia la pared opuesta. Al comienzo, era un entretenimiento muy placentero ver los vívidos e intensos colores producidos de tal modo; pero después de un rato de haberlos considerado más seriamente me sorprendí de ver que tenían una forma oblonga, la cual, según las conocidas leyes de la refracción, hubiera debido ser circular.

[Los colores refractados] estaban limitados en los costados por líneas rectas, pero en los extremos la disminución de la luz era tan gradual que era difícil determinar exactamente cuál era su figura, aunque parecía semicircular.

Comparando la longitud de este espectro de colores con su ancho, encontré que era cinco veces mayor; una desproporción tan extravagante que despertó en mí una extraordinaria curiosidad de examinar de dónde podría proceder. Apenas podía pensar que los variados espesores del vidrio, o que [el hecho de que este] estuviese envuelto en sombra u oscuridad, pudieran ejercer alguna influencia sobre la luz para producir tal efecto. Sin embargo, consideré que no estaría de más examinar todas estas circunstancias en primer lugar, y así probé lo que pasaría al transmitir luz a través de trozos de cristal de distintos espesores, o a través de orificios en la ventana de distintos tamaños, o colocando el prisma de tal manera que la luz pasase primero a través de él y fuera refractada [por él] antes de atravesar el orificio. Pero no encontré que ninguna de estas circunstancias fuera pertinente. El modo de los colores fue en todos los casos el mismo.

Decimos que la luz es monocromática cuando tiene un único valor perfectamente definido de frecuencia. El láser, por ejemplo. Los instrumentos utilizados en la separación del espectro de la luz no monocromática se denominan espectrómetros. Nos permiten no solo ver el espectro si no también determinar la longitud de onda de los distintos colores por los que está compuesta. Cada elemento de la naturaleza (los de la tabla periódica) posee su propio espectro de luz. Es decir que cuando lo perturbamos, por ejemplo aumentándole su energía al calentarlo hasta volverlo incandescente, nos devuelve luz visible de longitudes de onda perfectamente definidas (que percibimos como cierta combinación de colores definidos). Podemos decir que este espectro de emisión es único para cada elemento y representa su huella digital, de modo que estudiando la luz emitida por una cierta sustancia que desconocemos podemos identificar su composición química. Este estudio, llamado espectroscopía, tiene aplicaciones tanto en la física, como en la química y la astronomía. Nos permite estudiar desde un elemento químico en particular hasta la composición de las estrellas. En el material digital se ofrecen algunas actividades relacionadas.

Tú me quieres blanca. Fragmento del poema de Alfonsina Storni (1918)

*Tú me quieres alba,
Me quieres de espumas,
Me quieres de nácar.
Que sea azucena
Sobre todas, casta.
De perfume tenue.
Corola cerrada.*

*Ni un rayo de luna
Filtrado me haya.
Ni una margarita
Se diga mi hermana.
Tú me quieres nívea,
Tú me quieres blanca,
Tú me quieres alba.*

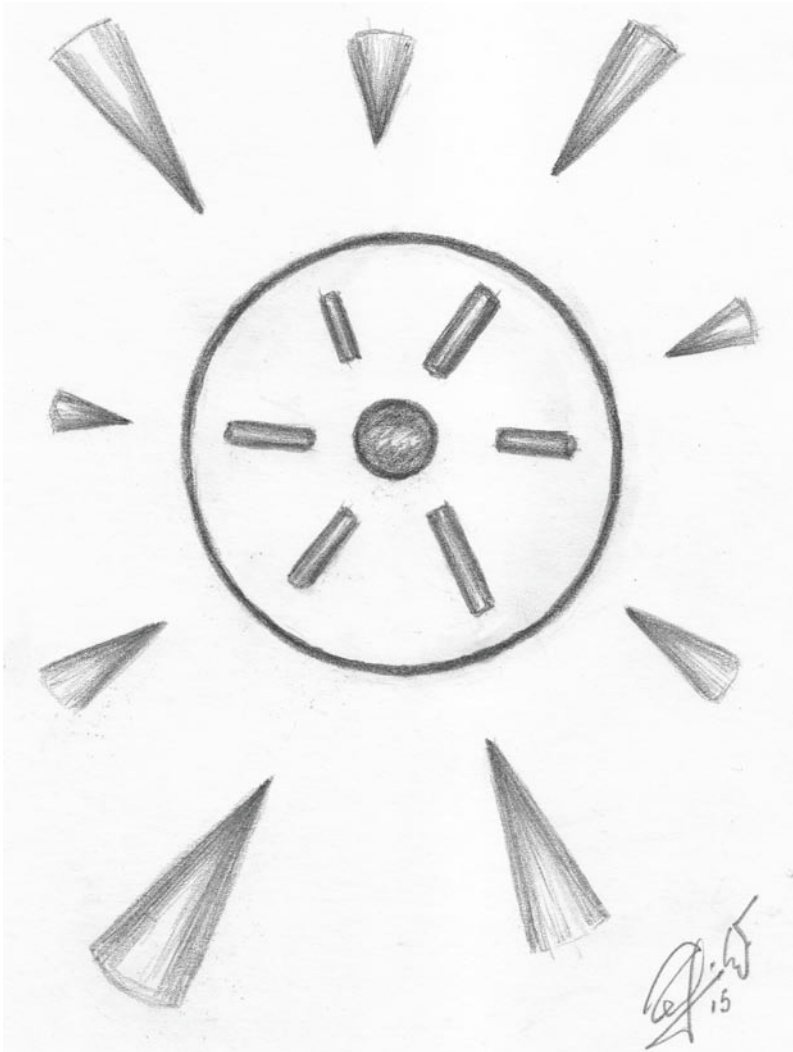
Alfonsina Storni: maestra, escritora y poetisa argentina (1892-1938).
En el material digital puede encontrarse un video alusivo realizado por el Canal Encuentro.

El color es un invento del cerebro

La luz visible es sólo una pequeña porción del espectro electromagnético. Nuestros ojos, junto con el cerebro, forman los sensores o detectores fisiológicos que nos permiten distinguirla, pues están preparados para trabajar dentro de un cierto rango de frecuencias o longitudes de onda. De manera análoga, nuestra piel es un sensor que puede captar cierta parte del espectro infrarrojo produciéndonos la sensación de calor.

Una pregunta que todos nos hemos hecho alguna vez es por qué vemos los objetos de distintos colores. Para la física el color está asociado a la frecuencia (o longitud de onda) de la luz.

Pero el color de la luz, y la sensación de color que puede generar en nuestra percepción, son dos conceptos diferentes.



Ilustra: Lido Iacopetti

Hay un factor a tener en cuenta para entender por qué un objeto se ve del color que se ve: la fuente que lo ilumina. La luz de las velas contiene poco azul y los objetos iluminados se ven amarillentos. Las lamparitas incandescentes emiten abundantemente en la gama de los rojos. Las lámparas fluorescentes emiten una luz más “fría”, resaltando los objetos azules. La luz solar, en cambio, es una combinación de todas las frecuencias visibles, aunque no en igual proporción. Las más abundantes son las ondas en la gama del verde-amarillo, mientras que el rojo y azul no lo son tanto, y el violeta está en aún menor proporción. El color físico de una fuente de luz queda definido por lo que se denomina su composición espectral: las longitudes de onda específicas que la componen, acompañadas de sus respectivas intensidades.

Sin embargo, a pesar de que podemos decir desde la biofísica que el color es la respuesta fisiológica de nuestro sistema ojo-cerebro ante el estímulo de luz de un rango dado de frecuencias, la percepción de los colores es un proceso muy complejo que no está del todo comprendido.

Por ejemplo, sabemos que percibimos la luz con frecuencias entre 500 y 520×10^{21} hertz de color amarillo. Pero también vemos amarillo superponiendo un haz rojo y uno verde, aunque la frecuencia de la luz de estos colores no es la misma que la del amarillo, sino que está en otro rango. Es decir, a pesar de que una composición espectral determina inequívocamente un color, la misma sensación de color puede obtenerse con composiciones espectrales diferentes. Aunque existen varias teorías⁵ al respecto, el mecanismo que conduce a la percepción no ha sido completamente esclarecido.

Blanco y negro

Se dice que blanco y negro no son realmente colores. La sensación de color blanco es generada cuando llegan al ojo todas las longitudes de onda que componen el espectro, con las proporciones adecuadas. Sin embargo, la misma sensación de blanco puede obtenerse por medio de la superposición de los llamados pares de colores complementarios, por ejemplo, se percibirá como blanco la superposición en una pantalla de luz azul y naranja.

5 Teoría tricromática, o de Young-Helmholtz; teoría de los procesos opuestos, de Hering; y teoría Retinex, de Land.

Tampoco son colores en sí mismos los distintos grises, sino que son blancos con menos brillo. El negro es el caso extremo de la escala decreciente de brillantez, y puede obtenerse a partir de la reducción en el brillo de cualquier color. La manera en que se forman los colores con la luz es distinta a la de los pigmentos. Por eso, si mezclamos las luces de todos los colores obtenemos blanco, pero si mezclamos pigmentos de todos los colores obtenemos negro.

Color por reflexión

Los objetos opacos iluminados por la luz del Sol nos pueden parecer blancos, negros o de colores. Si vemos un objeto color blanco es porque refleja en igual proporción todas las radiaciones visibles del Sol y, por el contrario, si lo vemos negro es porque las absorbe todas y no refleja ninguna. Los objetos coloreados, en cambio, reflejan ciertos colores contenidos en la luz solar con más intensidad que otros. Es decir, si una manzana se ve verde es porque refleja el verde con más intensidad que los otros colores. Sin embargo, el tono que vemos en la fruta no es de una frecuencia de onda definida y única, sino que es una mezcla de frecuencias. Debe decirse que refleja con más intensidad un color, porque en realidad refleja más de una frecuencia. Esto ocurre porque en la piel de la manzana existen sustancias químicas, llamadas pigmentos, que tienen la propiedad de absorber selectivamente ciertas longitudes de ondas. Por ejemplo, a partir del cobalto se obtienen diferentes pigmentos: azul cobalto, azul cerúleo, violeta cobalto, amarillo cobalto. En el caso de los seres vivos, dos de los pigmentos más abundantes son la clorofila (que interviene en la fotosíntesis y es la responsable del verde de los vegetales) y la melanina (presente en piel, ojos y cabello)⁶. No olvidemos lo que mencionamos sobre el papel que juega la fuente de la luz con que iluminamos los objetos. Por ejemplo, si iluminamos una manzana con luz solar y nos parece roja, es porque los pigmentos de su cáscara reflejan más el rojo y el resto de los colores son absorbidos; pero

6 ¿Qué queremos decir con que un objeto refleja o transmite? Pasando de la descripción macroscópica que hacemos en el texto a un enfoque microscópico, interpretamos que la luz hace vibrar los electrones de los átomos y moléculas que forman los pigmentos. Cuando la frecuencia de la luz coincide con la de resonancia del átomo, es absorbida, mientras que la luz de frecuencias mayores y menores es remitida, volviendo al medio o atravesando el material, según sea opaco o transparente. La energía de la luz absorbida por los materiales hace que suban su temperatura.

si a esta misma manzana la iluminamos con una fuente de luz exclusivamente amarilla (como una lámpara de sodio, la veremos negra, pues el amarillo será completamente absorbido).

Color por transmisión

Los colores de los objetos transparentes dependen del color de la luz que dejan pasar. Los objetos transparentes coloreados se suelen llamar filtros. Por ejemplo, vidrio, acrílico o celofán, tonalizados con ciertos pigmentos. Un filtro rojo, se ve rojo y también “selecciona” la luz roja. Expuesto a la luz, transmite (y refleja) preferencialmente las ondas cuya frecuencia corresponde al color rojo, mientras que el resto son absorbidas. En general, el filtro es del mismo color que la luz que deja pasar. En el caso de los objetos transparentes incoloros, todas las frecuencias de la luz son transmitidas por igual. Entonces, si miramos a través de un filtro rojo un objeto que refleje el rojo y que esté iluminado con una fuente que emita algo de luz en las frecuencias del rojo, entonces el objeto se verá rojo. De lo contrario, nos parecerá negro. En conclusión, para saber de qué color se verá un objeto necesitamos saber con qué luz será iluminado (qué colores estarán presentes) y qué colores refleja. La energía de las ondas cuyas frecuencias son absorbidas hace que los objetos se calienten cuando los iluminamos.

Ah, te vi entre las luces. Fragmento de canción de La máquina de hacer pájaros. (1976)

*Estás sentada en el aire.
Nada de luz esperando que marquen tres
Esperando verme otra vez
Está bien, está bien, está bien...
Ah! Te vi entre las luces con tu cara toda azul...*

La máquina de hacer pájaros: banda argentina de rock progresivo (1975-1977), liderada por Charly García, quién la definió como “el Yes del subdesarrollo”. En el material digital se encuentra el video.

Colores estructurales

A diferencia de los colores pigmentarios, que dependen del tipo de material del que está conformado aquello que estamos mirando, existen también los llamados colores estructurales, que dependen de la geometría de la superficie sobre la que incide la luz. Los colores estructurales no quedan determinados por los pigmentos de un material, sino por la interacción entre la luz y la estructura de su superficie. Físicamente, los fenómenos que ocurren son los que ya hemos mencionado: la interferencia, la reflexión y la refracción.

Hay diferencias apreciables entre ambos: mientras que el color (pigmentario) de la manzana se ve igual desde todos los ángulos de visión, el color (estructural) de las alas de las mariposas se percibe como iridiscente y depende de la orientación con que se la mire. Podemos distinguir fácilmente entre los dos tipos de “colores” observando un recipiente con detergente (veremos su color pigmentario) y mirando luego el color de las burbujas que podemos hacer a partir de él (veremos en ellas un color estructural). Aunque el material -detergente- es el mismo, los fenómenos ópticos que están ocurriendo son diferentes. En el material digital se proponen algunas actividades sobre percepción del color.

¿Qué es el arco iris?

El arco iris es un llamativo fenómeno que se observa en el cielo bajo ciertas condiciones luego de la lluvia, y que ha dado origen a muchas leyendas. También se han esbozado distintas explicaciones. Aristóteles pensaba que las nubes actuaban como un conjunto de espejos reflejando la luz del sol. Ya en la Edad Media, Robert de Grosseteste, un eclesiástico británico, afirmaba en cambio que se debía a la refracción de la luz en la humedad de una nube convexa. Posteriormente, Teodorico de Friburgo consideró que el efecto se debía a la “suma” del efecto de la luz en cada gota individual de la nube, e incluso realizó algunos experimentos. Según la visión actual, debida a Newton y Descartes, entendemos que se produce cuando las pequeñas gotas de lluvia, actuando como prismas, separan en colores a la luz del sol. Es decir que para verlo hay que mirar hacia la lluvia mientras tenemos el sol a nuestras espaldas.

A veces se pueden ver dos arcos: el más bajo, más intenso, que forma un ángulo de 42° con respecto a los rayos del sol y tiene el color rojo arriba, en su borde exterior, y el violeta debajo (en su borde inferior). Y otro más arriba de éste, formando 52° , concéntrico con el primero, más débil y con los colores ordenados al revés. Los ángulos a los cuales nos referimos son los de un cono cuyo eje une el centro del arco iris y los ojos del observador. Habrá entonces un arco iris diferente pasando por los ojos de cada observador.

El color en la cultura

La física entiende los colores como ondas electromagnéticas de diferentes frecuencias que nuestros ojos pueden percibir con el sentido que llamamos vista. Sin embargo, existen otras maneras de “acercarse” a los colores, pues es innegable que están ligados culturalmente a distintas sensaciones e ideas. Incluso puede hablarse de un lenguaje de los colores: elegimos el rojo como símbolo del amor. El blanco representa la limpieza y pureza. Pero estos significados no son completamente universales, ya que para diferentes culturas no tienen necesariamente las mismas interpretaciones.

El color del cielo, del mar y del sol

En esta sección presentamos una recopilación de textos breves que, con diferentes lenguajes y enfoques, se aproximan desde la física al porqué de los colores.

¿Por qué el cielo es azul?

Adaptación del artículo de David Jou y Marià Baig (1993)

“Es Maxwell quien, en 1865, propone una teoría electromagnética de la luz, en uno de los trabajos más importantes de toda la historia de la Física. Según esta teoría, la luz está constituida por ondas electromagnéticas que pueden propagarse en el vacío. Es así como llega la luz del Sol hasta la Tierra. Su sucesor en Cambridge, lord Rayleigh uno de los primeros premios Nobel en esta disciplina, estudia los efectos de las ondas electromagnéticas sobre una carga⁷ que pueda oscilar. La carga es puesta en movimiento por la onda electromagnética. En ese movimiento, la carga absorbe energía de la onda incidente y la dispersa en las ondas que emite en todas direcciones.

Los cálculos de lord Rayleigh establecen que cuanto mayor es la frecuencia de la onda, más dispersión (scattering) se produce. En otras palabras: las ondas de frecuencias más elevadas (azules, violetas) se dispersan más que las de frecuencias no tan elevadas (rojo, anaranjado). Esta tendencia es muy acusada, ya que es proporcional a la cuarta potencia de la frecuencia de la radiación; en otras palabras: al duplicar la frecuencia de la radiación, se multiplica por un factor 16 la capacidad de dispersión de la onda. Como la frecuencia de las ondas correspondientes a la luz azul es casi el doble de la correspondiente a la luz roja, la primera será dispersada casi dieciséis veces más eficazmente que la segunda.

Miremos, ahora, el cielo. La luz del Sol alcanza las moléculas de la atmósfera, y son éstas las que, al dispersarla, la hacen llegar a nuestros ojos. La ausencia de aire que disperse la luz es el motivo por el cual el espacio exterior a nuestro planeta o los cielos de las fotos tomadas en la Luna por astronautas sean negros, pese a estar llenos de luz.”

7

Se refiere a una carga eléctrica.

El color del mar

Por Cecilia von Reichenbach, (2009)

Si alguien pregunta de qué color es el mar, le dirán que es azul o verde, pero nunca rojo o amarillo. Responder por qué predominan algunos colores sobre otros ocasionó, a principios del siglo XX, dolores de cabeza a más de un investigador. Por ejemplo, en Inglaterra, Lord Rayleigh decía que el mar es azul sencillamente debido al reflejo del cielo sobre la superficie del agua. En cambio, en la India, Raman opinaba que el fenómeno se debía a la dispersión de la luz solar por las moléculas de agua. Él decía que de todos los colores recibidos, estas moléculas prefieren la luz azul.

Mientras que los demás colores siguen su camino, el azul es remitido por las moléculas en múltiples direcciones. Por su parte, Ramanathan, inspirado por las ideas de Raman, lo atribuía a la dispersión de la luz del Sol en el agua, pero sobre todo a una posterior absorción -es decir que los demás colores no siguen su camino, sino que son absorbidos por las moléculas-. Mientras tanto, Richard Gans, en La Plata, sostenía que el mar debía su color a la dispersión de los rayos solares, pero también a cierta absorción y reflexión: las moléculas de agua absorben más el color rojo que el azul, y dispersan más el azul que el rojo, mientras que cierta proporción de la luz solar es reflejada por la superficie. Hoy sabemos que todos tenían algo de razón. La dispersión, la absorción y la reflexión de la luz solar en el agua son las que producen los hermosos colores del mar. No todos estos fenómenos participan por igual: su importancia depende de la profundidad del agua, de las características del fondo, de los materiales disueltos, y gracias a eso el mar presenta una gran variedad de matices. Los poetas agradecidos.

El color del Sol

Por Guillermo Abramson (2012) (adaptación)

Hace poco, cuando comenté sobre el tamaño del Sol visto desde los distintos planetas, hice una figura con el Sol pintado de amarillo. Y me quedé pensando. ¿Por qué pinté el Sol de amarillo? Por tradición, evidentemente. Désele a un niño una caja de crayones y una hoja de papel y pídale que dibuje el Sol. Usará el crayón amarillo. Seguro, cien por ciento de las veces. Sin embargo, el Sol es blanco. Ups.

La luz del Sol, como sabemos, está compuesta por luces de colores. Son los colores que vemos en el arco iris, que forman el espectro del Sol. Como cualquier cuerpo incandescente, el Sol emite luz en un continuo de colores, en el que la intensidad de cada uno depende de la temperatura del cuerpo. El espectro del Sol es en gran medida el de un cuerpo a 5778 K (que son 5505 °C). Esta temperatura hace que el máximo de intensidad esté en el color verde del espectro. Sí: el color que aparece más intensamente en la luz del Sol es el verde, o mejor dicho el verde-azulado.

Sin embargo, la mezcla de colores de la luz del Sol es blanca. ¡Si el Sol fuera amarillo, un objeto blanco no se vería blanco sino amarillo! Un objeto blanco es uno que refleja por igual todos los colores que recibe. La nieve, las nubes, son buenos ejemplos. Si el Sol fuera amarillo, las nubes serían amarillas. La nieve sería amarilla.

Por otro lado, la definición fisiológica de una luz blanca es una luz que excita los sensores de color en los conos de la retina por igual, y con suficiente intensidad (si la excitación no es muy intensa, la percepción es gris). La luz del Sol es tan intensa que satura la excitación de los tres tipos de conos, de manera que el Sol es blanco.

De todos modos, debería haber alguna explicación de por qué pintamos el Sol de amarillo. Busqué en la web, y no me satisface ninguna de las respuestas que encontré. Se dice, por ejemplo, que la atmósfera dispersa parte del azul, y que por eso se ve el Sol corrido hacia el amarillo. Pero que desde el espacio exterior se lo ve blanco. Sin embargo, la noción de “blanco” es anterior a los viajes espaciales. Nuestros ojos evolucionaron bajo esta luz del Sol, filtrada por la atmósfera de nitrógeno y oxígeno de nuestro planeta. Ésa es la luz que vemos blanca.

Cuando algún medio lo filtra lo suficiente, y podemos mirarlo sin deslumbrarnos (y sin peligro), por supuesto que el color puede ser otro. A lo mejor por ahí viene la explicación: cuando podemos mirarlo a la cara, el Sol no es blanco. Al salir y al ponerse, por ejemplo, la luz directa del Sol atraviesa varios miles de kilómetros de aire denso, de manera que el azul se dispersa con bastante eficacia y se lo ve, ciertamente, más amarillo, anaranjado o rojo. Como en la foto del atardecer en Monte Hermoso (ver material digital)

Cuando lo filtran las nubes, si tiene algún color, es muy sutil y no llego a decidirme. Cuando lo filtran las cenizas volcánicas, lo he visto con un tono azulado.

¿Y cuando está alto, sin nubes ni ceniza? ¿Es posible que el Sol, alto en un cielo despejado se perciba de un color amarillo por contraste con el azul que lo rodea? El amarillo es el color complementario del azul, después de todo. Y mientras se puede observar sin dificultad el cielo azul, mirar al Sol “duele” (¡y hace daño, no lo hagan!).

En definitiva: le he dado vueltas a esta cuestión pero todavía no tengo una respuesta que me satisfaga del todo. Qué se le va a hacer.

Láser

LASER es un acrónimo que significa “Amplificación de la Luz por Emisión Estimulada de la Radiación”, por sus siglas en inglés.

En 1960 el físico Theodore Maiman, trabajando con un cristal de rubí, unos espejos y un flash parecido al de los fotógrafos, obtuvo un estrecho haz de luz de color rojo, tan potente que podía quemar y hasta perforar objetos: fue el primer láser que funcionó de un modo práctico. La idea para hacer un láser fue planteada por primera vez por Einstein, quien previó la posibilidad de que en ciertas condiciones los átomos emitieran luz de una misma frecuencia. Unos años antes de que funcionara el prototipo pionero, el físico Charles Townes había dicho sobre el láser: “No está nada claro, ni siquiera para quienes lo investigan, que llegue a tener aplicaciones importantes”. Esta predicción estuvo lejos de la realidad: hoy lo encontramos en reproductores de discos compactos, impresoras, radares, armamento bélico, instrumentos de cirugía. Lo usamos para soldar y agujerear metales, tomar fotografías de alta velocidad, medir distancias, transmitir señales. Hubo una extensa guerra entre varios científicos de la época por la patente del láser. Pero esa es otra historia.

El LÁSER posee características muy especiales que los diferencian de otras fuentes de luz: su brillo; su monocromaticidad (emisión de luz de una sola longitud de onda bien definida); su coherencia (las ondas de la luz viajan en fase temporal unas con otras); y su direccionalidad o colimación (esto

es, a diferencia de la luz ordinaria como la de una lamparita incandescente, la luz láser diverge muy poco).

La luz láser puede ser absorbida por distintos componentes de los tejidos vivos, y de esto surgen las aplicaciones médicas del láser y los efectos biológicos perjudiciales.

Todas estas características hacen que actualmente se investigue profusamente en las tecnologías y usos relacionados con el láser. Más adelante, en la sección “La luz es ciencia y tecnología” describiremos brevemente qué se hace en este campo en nuestro país.

Láser viviente

Los físicos Malte Gather y Seok Hyun Yun, de la Harvard Medical School en EE. UU., fueron los primeros en fabricar un láser a partir de una célula viva. Estos científicos modificaron genéticamente células embrionarias humanas de riñón para que produjeran una proteína fluorescente verde, como la que produce naturalmente una especie de medusa. Iluminando con una intensa luz azul la proteína fluorescente de la célula se logró que las moléculas emitieran una luz intensa, monocromática y direccional. Como las células estaban dispuestas entre dos pequeños espejos, la luz resultaba amplificada en cada pasaje. Este fenómeno no destruye las células y se especula que -entre otras cosas- podría ser utilizado en un futuro para distinguir las cancerosas de las sanas. Este experimento fue publicado en la revista *Nature Photonics* y fue uno de los diez hitos de física del año 2011, seleccionados por la revista *Physics World*. Puede verse la foto en el material digital.

Capítulo 4

Historias recientes y no tanto

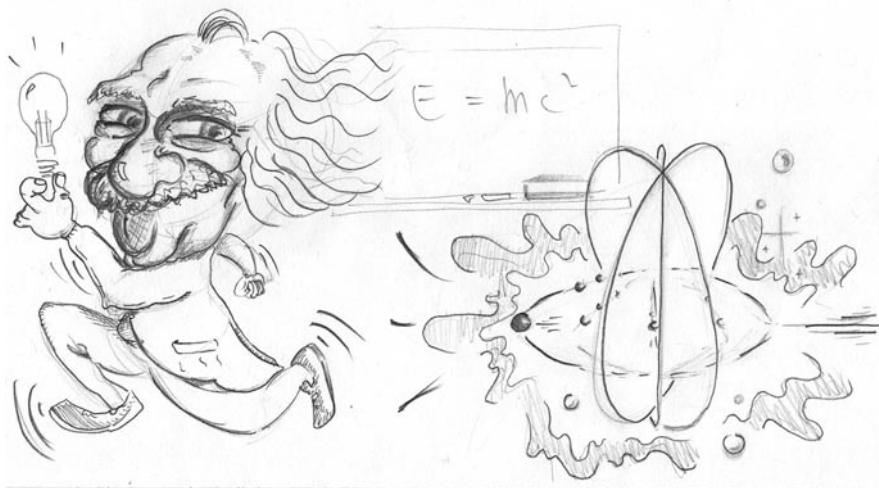
En esta sección presentamos algunos relatos de la cocina de la física relacionados con la luz, que son ejemplos de la manera en que se construye el conocimiento en esta disciplina. Estas historias muestran que en el desarrollo de la ciencia y en la generación de nuevos conocimientos acerca del mundo no se sigue el famoso “método científico”, en el sentido de receta única e infalible sino que son procesos inmensamente más complejos.

La concepción de este método como conjunto de reglas aplicables de modo universal para conseguir como resultado conocimiento científico es de algún modo, ingenua y se ha heredado de algunas perspectivas epistemológicas pasadas⁸. El modo de trabajar de los investigadores resulta menos lineal: Actualmente se entiende que el conocimiento científico se construye a través de procesos de elaboración de teorías y modelos que intentan dar sentido a un área de conocimiento o un grupo de fenómenos. Así, los apartados que siguen intentan reflejar el carácter dinámico y perecedero del conocimiento científico, poniendo en evidencia su dependencia del contexto histórico y su condición provisoria.

La metodología científica se concibe a través de ellos como un proceso abierto, cuyas fases se determinan en función del área de aplicación; las problemáticas a investigar; tipo de estudio y sus objetivos; el contexto histórico; los intereses de los investigadores o la comunidad; los recursos disponibles, entre otras cosas.

8 Es un concepto que combina elementos del empirismo-inductivismo del siglo XIX con aspectos del positivismo lógico de principios del siglo XX.

Una pregunta sobre la propagación de la luz que tuvo que esperar hasta fines del siglo XVII para ser respondida es la que se refiere a su velocidad. ¿Se trataba de un fenómeno instantáneo, es decir, la luz viajaba con velocidad infinita, o tenía una velocidad finita aunque demasiado grande como para ser apreciada en lo cotidiano? Su enorme magnitud no permitía distinguir fácilmente si se trataba de uno u otro caso. Su velocidad pudo estimarse, y finalmente medirse, con el famoso experimento de Michelson. Uno de los pilares fundamentales de la física actual tiene que ver con la luz: la teoría de la relatividad especial de Einstein establece la velocidad de la luz como un límite infranqueable. Aunque esta teoría data de 1905, en la actualidad fue fugaz objeto de cuestionamiento en lo que se conoce como “El affaire OPERA”. En este proyecto se midió erróneamente una velocidad mayor a la de la luz en unas partículas llamadas neutrinos.



Ilustra: Gastón Sergnese

La supuesta detección de velocidades superlumínicas de los neutrinos.

Por Gastón E. Giribet

El Laboratorio Nacional Gran Sasso de Italia anunció el 23 de septiembre de 2011 la detección de partículas que, aparentemente, tendrían una velocidad mayor a la de la luz. Se trata de las partículas llamadas neutrinos, las cuales se conocen desde hace ya varias décadas, pero de las cuales hemos aprendido mucho recién en los últimos años. La existencia de los neutrinos fue predicha en la década del '30 por W. Pauli, y éstos fueron observados recién a mediados de la década del '50. Hace tan solo unos diez años que se consiguió evidencia significativa de que los neutrinos tienen masa (durante mucho tiempo se creyó que no era así) y que, debido a la pequeñísima masa que tienen (a lo sumo unos pocos electronvoltios, es decir, cerca de una milmillonésima parte de la masa de un átomo de hidrógeno), se comportan de manera muy curiosa, cambiando sus propiedades con alternancia, oscilando su identidad a medida que viajan. Y como si este deambular esquizofrénico no fuera ya suficiente para merecer nuestra sorpresa, se suma hoy el notable anuncio de los científicos en el Gran Sasso. Si sus mediciones resultaran ciertas, algunos neutrinos viajarían más rápidamente que la luz, excediendo la velocidad de ésta en una parte en cien mil.

La forma en la que los físicos dicen haber medido este efecto es sencillo de explicar, aunque muy difícil de implementar experimentalmente, dada la gran cantidad de detalles a los que es menester atender: los físicos del laboratorio italiano se disponen a medir con gran exactitud la distancia recorrida por un rayo de neutrinos y medir también el tiempo empleado en recorrer dicha distancia. Luego, la velocidad a la que los neutrinos viajan se obtiene, como sabemos desde el preescolar, al dividir la distancia por el tiempo empleado en recorrerla. Los neutrinos son partículas que interaccionan muy débilmente con la materia, razón por la cual es imposible evitar que rayos de estas partículas escapen tras las paredes de los aceleradores de partículas como producto residual de tales experimentos. Los físicos, lejos de desaprovechar esos neutrinos escapistas, aprovechan los rayos para realizar otros experimentos y entender así sus propiedades. De hecho, fue este el truco empleado para detectarlos en los '50. Y es esto lo que ocurre también con los neutrinos producidos en el acelerador del CERN, en la frontera franco-suiza. Luego de abandonar los detectores de muones del CERN, los neutrinos pro-

ducidos allí viajan cerca de 732 kilómetros hasta la cordillera de los Apeninos, donde son detectados por el experimento llamado OPERA, que está ubicado bajo 1400 metros de piedra, en el Laboratorio Nacional Gran Sasso de Italia. Debido a la mencionada propiedad de interaccionar débilmente con la materia, los neutrinos ven al macizo Gran Sasso casi transparente. Y es esa la razón por la que el experimento se encuentra en las profundidades, cobijado por la piedra, donde prácticamente sólo los neutrinos pueden llegar.

Cabe mencionar que no es la primera vez que se observa este tipo de comportamiento super-lumínico de los neutrinos. Resultados similares habían ya sido obtenidos por el experimento denominado MINOS, ubicado en el Medio Oeste de los Estados Unidos. No obstante, el grado de exactitud de OPERA es mucho mayor y es esto lo que hace tan importante el anuncio. También sería necesario explicar cómo el hecho de que estos neutrinos producidos en el CERN y detectados en el Gran Sasso superen la velocidad de la luz no entra en tajante contradicción con las observaciones de neutrinos provenientes de supernovas lejanas, como es el caso de la supernova SN1987a, cuya emisión de anti-neutrinos fue detectada en el momento esperado en concordancia con los modelos de evolución estelar.

Los neutrinos son emitidos pocas horas antes del estallido de luz en una supernova de esas características, y los neutrinos de SN1987 fueron observados precisamente con esa antelación, y no una mayor, a la emisión de luz asociada. Si aquellos neutrinos producidos en la explosión SN1987a, acaecida a una distancia de 168.000 años luz de la Tierra, hubieran tenido la velocidad que se les adjudica a los neutrinos italianos, entonces habrían aquéllos arribado a la Tierra varios años antes.

Ahora bien, ¿por qué sería tan importante se descubriera que una partícula diminuta y reticente a interaccionar con la materia viaja más rápido que la luz? La respuesta es que un descubrimiento de esta índole pondría en tela de juicio uno de los pilares fundamentales de la física: la existencia de partículas que viajen más rápidamente que la luz está en tajante contradicción con la teoría de la relatividad especial de Einstein, la cual establece la velocidad de la luz como un límite infranqueable. Violarlo representaría una crisis fundamental en la física teórica, ya que llevaría en germen el problema de poner en riesgo la noción de causalidad.

Es así como si los resultados del experimento italiano llegaran a ser confirmados sería necesario rever de cuajo varios aspectos fundamentales de la física que conocemos. No obstante, en estos casos, la actitud que prevalece

en la comunidad científica es siempre la cautela. Lo más probable es que la supuesta observación de velocidades super-lumínicas de los neutrinos en el Gran Sasso se deba, en realidad, a algún error sistemático del experimento. Es por esto necesario que otros laboratorios confirmen las mediciones de manera independiente, y que se evalúe si no se ha cometido algún error en el experimento efectuado o en la interpretación del mismo. No sería, pues, la primera vez que la teoría de la relatividad saliera triunfante luego de haber sido desafiada.

En febrero de 2012, y luego de haber repetido el experimento Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus (OPERA) con los mismos resultados, se ha reconocido la existencia de un error sistemático. En el portal de la prestigiosa revista Science se informó que los sesenta nanosegundos de diferencia en el tiempo medido se debían a una falla en la conexión de un cable de fibra óptica que iba desde el receptor del satélite GPS a la plaqueta de adquisición de datos en una computadora.

Para despejar dudas, no obstante, se realizó otro experimento independiente, de nombre Icarus, en el cual neutrinos provenientes del CERN fueron observados con otro detector (el detector ICARUS, sigla de “Imaging Cosmic and Rare Underground Signals”) localizado también en Gran Sasso.

El tiempo que tardaron los siete neutrinos que participaron del experimento en recorrer los 732 km. hasta el detector se midió también de modo diferente al OPERA y el resultado final fue anunciado en marzo de 2012: los neutrinos efectivamente viajan a velocidades consistentes con la de la luz, satisfaciendo así la teoría de la relatividad.

Rayos catódicos y materia radiante

Adaptación del artículo “Experimentos con rayos que hicieron historia”

Por Paula Bergero (2008)

En este apartado, reseñaremos la historia de algunos fenómenos relacionados con la luz: la emisión luminosa en tubos de baja presión, la luminiscencia relacionada con los Rayos X, la fluorescencia, y la radiactividad.

En la década de 1870, el reconocido químico británico William Crookes, creyó que había encontrado un nuevo estado de la materia que se sumaba a los tres ya conocidos (sólido, líquido y gaseoso) y que tenía luz propia: la materia radiante.

*Como muchos otros investigadores, tenía diversos intereses: creía que podía estudiar científicamente la “fuerza psíquica” que ejercían los médiums mediante experimentos. Fue uno de los más importantes investigadores de lo que se llama Espiritismo Científico. Llegó incluso a publicar un artículo en la revista *Quarterly Journal of Science* –de la cual fue editor–, donde clasificaba los 13 tipos de fenómenos que había observado.*

En aquel entonces, los científicos estaban completando la Tabla Periódica, descubriendo nuevos elementos químicos. Crookes era experto en la identificación de sustancias químicas a partir de sus espectros de emisión, y había descubierto un nuevo elemento: el Talio. Entre otras cosas, generaba y estudiaba descargas eléctricas en tubos con gases a baja presión. Alrededor de 1875, Crookes mejoró los tubos de vacío inventados por Geissler. Estos tubos tenían dos placas metálicas (ánodo y cátodo) y cuando se conectaban a una fuente eléctrica mostraban zonas luminosas, diferentes según la presión del gas. Crookes consiguió alcanzar presiones aún más bajas, obteniendo descargas que se propagaban en línea recta, en forma de rayos. Cuando estos misteriosos “rayos catódicos” impactaban contra las paredes del vidrio generaban un llamativo resplandor verde pálido.

Motivado por su descubrimiento, hizo más experimentos. Haciendo girar molinillos de mica dentro de los tubos se convenció de que estaba observando materia, pero en un nuevo estado, que llamó radiante. Pensaba que, en el alto vacío del tubo, el gas llegaba a un inconcebible estado de división, y sus átomos eran rechazados por el cátodo, generando los rayos. Además, los rayos podían producir también efectos térmicos y ser desviados por campos magnéticos, sugiriendo que se trataba de partículas eléctricamente cargadas emitidas por el cátodo.

Controversia

Otros investigadores se sumaron al estudio del nuevo fenómeno y pronto se generó un debate. El físico alemán Lenard era el principal opositor a la hipótesis de Crookes. Había observado que los rayos catódicos podían atravesar láminas metálicas delgadas sin ser desviados de su trayectoria recta. Sostenía que no podía tratarse de partículas sino de “perturbaciones ondulatorias del éter” (actualmente, ondas electromagnéticas).

Muchos ingleses se sumaron al bando de Crookes; entre otros, Thomson y FitzGerald. Pero los alemanes, en cuyas filas se encontraban Hertz y Goldstein, se alinearon detrás de Lenard. No es la materia que viaja -decían-, es el éter que vibra.

Por otra parte, la crítica a sus investigaciones “del otro mundo” fue unánime. Aún así, en 1907 recibió el Premio Nobel de Química.

Consecuencias de los experimentos de Crookes: Rayos X

En 1895, Wilhem Röntgen se entusiasmó con la fluorescencia observada por Crookes. Se preguntaba si los rayos catódicos atravesaban el vidrio de los tubos y, para comprobarlo, cubrió con cartón uno de los mismos. No observó ningún resplandor, pero sí vio luminiscencia en una pantalla de platinocianuro de bario que tenía en su laboratorio. Durante las siguientes semanas, repitió el experimento interponiendo diferentes materiales entre la pantalla y el tubo, notando que sólo el plomo podía impedir la luminiscencia.

La conclusión era inevitable: el tubo emitía algún tipo de radiación invisible pero penetrante en la materia. Cuando intentó fotografiar este fenómeno encontró otra sorpresa: las placas que tenía estaban veladas. Para comprobar el alcance de la radiación en la emulsión, colocó el tubo y la placa fotográfica en distintas habitaciones, consiguiendo una imagen de la puerta que las separaba.



Ilustra: Maite Peláez

Röntgen obtuvo también impresiones del paso de la radiación a través del cuerpo humano. La primera radiografía fue una imagen de la mano de su esposa Bertha luego de una exposición de 15 minutos. Röntgen se convirtió en el científico del momento. Había descubierto los rayos X. Posteriormente a su conferencia de 1896 cosechó múltiples reconocimientos y en 1901 recibió el Nobel de Física. A pesar de las posibles aplicaciones, Röntgen se negó a comercializar o patentar su descubrimiento, argumentando que el beneficio pertenecía a la Humanidad.

Radiactividad

En 1896, motivado por las investigaciones de Crookes y Röntgen, Henri Becquerel retomó el estudio iniciado por su padre sobre minerales fluorescentes.

Como en los tubos de Crookes la emisión de rayos X estaba acompañada de la fluorescencia, Becquerel se preguntó si sus materiales luminosos emitirían también rayos X.

Comenzó a experimentar: exponía una muestra de sal de uranio a la luz del Sol y luego la depositaba sobre una placa fotográfica cubierta por un grueso envoltorio. Observaba que la placa se velaba. Un día nublado alteró su rutina: sin previa exposición, colocó la muestra sobre la placa y la guardó a la espera de días soleados. Poco después, con un presentimiento, reveló la placa y encontró la veladura provocada por la muestra, notando que la radiación se emitía sin necesidad de la exposición a la luz.

Había descubierto la propiedad de ciertas sustancias de emitir por sí mismas radiación penetrante. Esta radiación fue posteriormente nombrada radiactividad por Mme. Curie. Cuando Becquerel (y el resto de la comunidad) observó que no podía obtener imágenes de huesos, como ocurría con los rayos X, se desinteresó del asunto. Más tarde, propuso a la joven estudiante Marie Curie que continuara la investigación. Junto al matrimonio Curie, Becquerel recibió el Premio Nobel de Física en 1903.

El electrón

En la prolongada controversia onda-partícula, Joseph J. Thomson dio la respuesta definitiva, al menos hasta el advenimiento de la Mecánica Cuántica. Diseñó un dispositivo para hacer pasar los rayos por un campo magnético o eléctrico, desviando sus trayectorias. Aplicando un campo electromagnético, y mediante argumentos teóricos, pudo determinar tanto la velocidad de las partículas como el cociente entre su carga eléctrica y su masa.

En aquel tiempo, las únicas partículas cargadas negativamente que se conocían eran los iones negativos de los átomos. Pero las partículas de los rayos catódicos no podían identificarse con tales iones, pues para ser desviadas tan marcadamente debían poseer una carga eléctrica inimaginablemente elevada, o bien, tratarse de partículas, mil veces más livianas que el átomo más ligero.

Esta última interpretación encajaba mejor y, por otra parte, los físicos habían intuido ya que la corriente eléctrica se trataba del movimiento de partículas cargadas. La emisión luminosa, nombrada inicialmente como rayos catódicos, fue entonces identificada como las trayectorias luminosas de partículas subatómicas al ionizar el gas. Estas partículas no eran cualesquiera, sino que se trataba de las unidades elementales de la electricidad, dándoseles el nombre de electrones.

La luz es ciencia y tecnología

Por Alberto Lencina

En Argentina existe mucha actividad científica y tecnológica en diversas áreas del conocimiento. Basta visitar el sitio web del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación, del CONICET o de las universidades, entre otros, para hacerse una idea de la magnitud y calidad de las labores científicas y tecnológicas desarrolladas por nuestros científicos y tecnólogos. Para dimensionar nuestras capacidades, recordemos que el satélite SAC-D/Aquarius, lanzado en 2011, fue íntegramente diseñado y construido en Argentina. Recordemos también que nuestro país sabe construir reactores nucleares desde hace años; que aquí se fabrican láseres prácticamente desde que se supo cómo construir el primero hace más de cincuenta años; que científicos argentinos participan de experimentos internacionales como los que buscan la “partícula de Dios”, y muchos más.

Si bien la génesis de la investigación científica en el área se remonta a un siglo atrás, no vamos a entrar en detalles históricos y nos concentraremos en lo que se hace hoy en día en investigación y desarrollos tecnológicos en temas relacionados con la luz: espectroscopía, óptica, láseres, fotofísica⁹, y fotónica¹⁰. En nuestro país hay una comunidad de alrededor de 200 personas que trabaja en esas áreas. Desde Salta hasta Bariloche, pasando por Tucumán, Corrientes, Rosario. Sin olvidarnos de Neuquén, Campana y Tandil, y teniendo presente a Buenos Aires, La Plata y Villa Martelli. En to-

9 La fotofísica estudia la interacción de los materiales con las ondas de luz visible y ultravioleta.

10 La fotónica es un área de la física análoga a la electrónica, pero en vez de basarse en corrientes de electrones lo hace en corrientes de fotones. Por ejemplo, los lectores de código de barras son instrumentos fotónicos.

das esas ciudades podemos encontrar científicos y tecnólogos trabajando con la luz.

La luz sirve para llevar y traer información. Esa información puede que “alguien” se la dé, puede que sea la información de la misma fuente de luz, o del lugar por donde pasó. Pero la luz no sólo sirve para eso: con luz se puede ocultar información, se puede cortar acero, se pueden generar y atrapar partículas muy pequeñas, y mucho más. Con luz se pueden medir distancias, temperatura, presión, rotaciones, vibraciones.

Si bien hay luces de muchos tipos (blanca, azul, verde, intensa y tenue, “cálida” y “fría”), existe un tipo de luz que se destaca entre todos los demás: el láser. Éste se caracteriza por tener un color bien definido y porque su luz se propaga como un “rayo” en forma recta. El primer láser se construyó hace poco más de 50 años y ha propiciado una revolución en el mundo de la ciencia y la tecnología ¡y en nuestra vida también! Argentina no quedó afuera de esa tendencia y ha construido y manipulado el láser desde entonces. Actualmente se estudia la forma de generar nuevos tipos de láseres en distintas configuraciones. Además, el láser es muy usado en diversos estudios y aplicaciones. En los próximos párrafos repasaremos para qué se lo emplea y qué se estudia o desarrolla con él.

Cuando alguien “pone” información en un láser, seguramente está intentando comunicarse, y hoy en día, aunque no lo notemos, gran parte de nuestras comunicaciones se realizan con láseres: llamadas telefónicas de larga distancia, televisión internacional, internet. Esas comunicaciones se realizan mediante el empleo de “cables de luz”: las fibras ópticas. En Argentina, los científicos estudian estrategias para mejorar y aumentar el volumen de las comunicaciones.

Pero las fibras ópticas no sólo sirven para comunicarse, sino también para extraer información de qué es lo que pasó en su entorno. Con esa idea, los tecnólogos argentinos desarrollan sensores de temperatura, presión y deformaciones basados en fibras ópticas.

Sin embargo, el láser no solo viaja por estos “cables de luz”, sino que también lo hace por el aire. Y justamente estudiando la luz que viaja por el aire es que se puede conocer un poco de lo que le está pasando a ese aire y un

poco de lo que tiene. Lo que le “está pasando al aire” tiene que ver con las turbulencias, los vientos, y eso importa, por ejemplo, cuando uno quiere saber cuánto afecta la atmósfera a las comunicaciones con láser. ¿Por qué nuestros científicos investigan ese tipo de comunicaciones? Porque utilizando láseres uno podría comunicarse más eficientemente con satélites como el SAC-D/Aquarius, o los futuros satélites argentinos, permitiendo recuperar mucha más información de sus instrumentos de medida. Por otro lado, cuando nos referimos a lo que “el aire tiene” hablamos de su composición: gases, partículas, nubes. Esos estudios permiten determinar, entre otras cosas, concentraciones de ozono y otros gases, y la altura de las nubes. Informaciones muy importantes para determinar el “estado de salud” de nuestra atmósfera.

Por eso, en Argentina existen dos estaciones (una en Villa Martelli y otra en Río Gallegos) integradas a una red mundial que monitorean continuamente nuestra atmósfera.

Y si de satélites hablamos, el láser no se queda afuera. En el SAC-D/Aquarius se incorporaron giróscopos láser construidos íntegramente aquí por nuestros tecnólogos. Y hay más desarrollos: actualmente se estudian técnicas láser para medir desplazamientos y distancias que van desde los kilómetros hasta la cien millonésima parte de un metro! Además, se están investigando técnicas que, utilizando fotones, podrían hacer que las computadoras calcularan muchísimo más rápido que las actuales y, al mismo tiempo, que la transferencia de datos sea considerablemente más segura. También se está montando una pinza óptica, que permitirá atrapar partículas de una millonésima de metro, y evaluándose distintas configuraciones que permitirán desplazar y hacer rotar tales partículas.

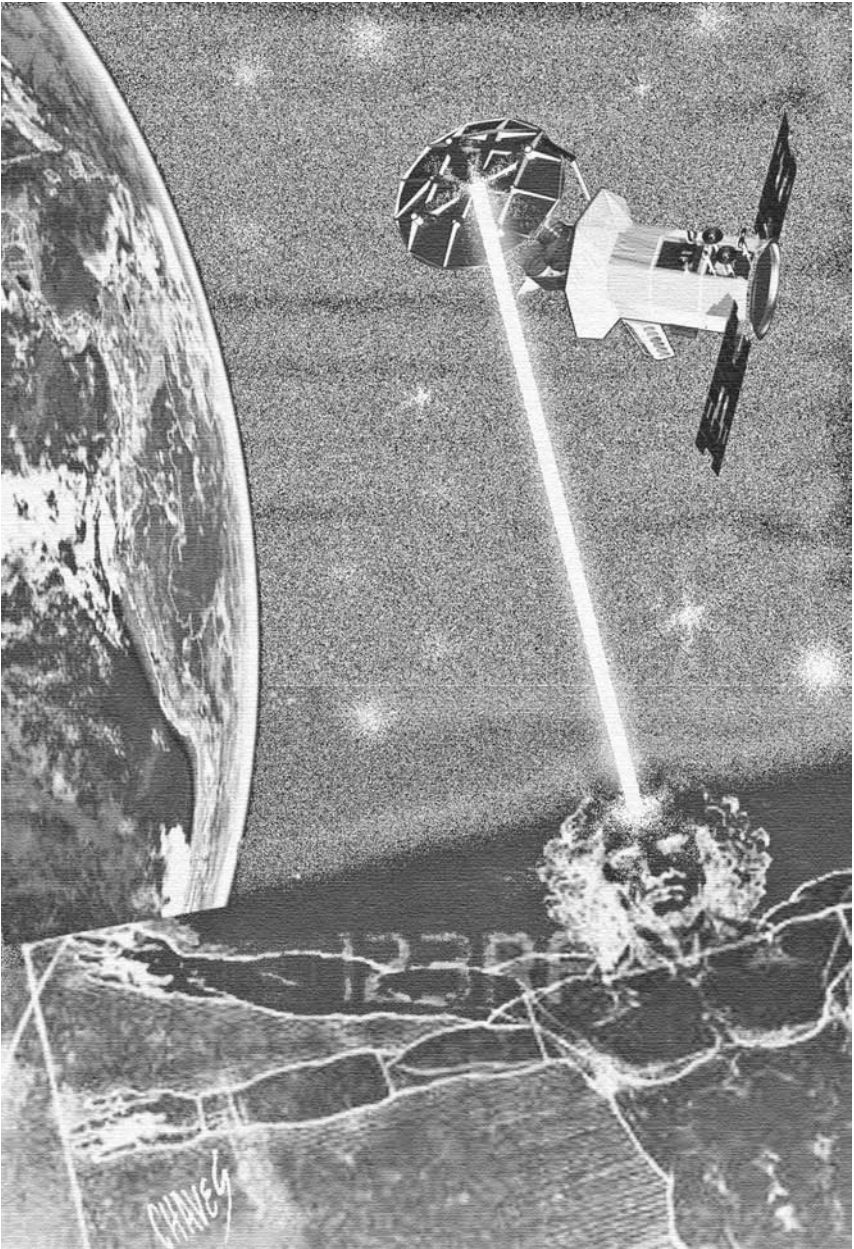
Así como se quema un papel cuando se enfoca sobre él la luz del sol con una lupa, si se hace incidir un pulso láser muy intenso y breve (¡de una cien millonésima parte de un segundo, o menor aún!) sobre un material, se produce la ablación del mismo por calentamiento, y se emite luz y sonido. La luz da cuenta de la composición química del material y el sonido es característico de su superficie. Así se ha desarrollado un instrumento para determinar la limpieza de superficies y se están diseñando otros para identificar la composición de recubrimientos. ¡Ambos desarrollos, realizados íntegramente por científicos y tecnólogos argentinos, y únicos en el mundo!

Como el láser permite concentrar una gran cantidad de energía en un punto en un tiempo muy pequeño, toda esa energía puede ser usada para cortar. Entonces, el láser se usa para cortar láminas de acero, plástico y madera de interés industrial o comercial, como así también para realizar perforaciones o partículas de menos de una millonésima de metro, o realizar cirugías oftálmicas. ¡Sí! ¡Todo eso en Argentina!

Pero no toda la luz es láser. Cuando los materiales emiten o absorben luz, lo hacen con un conjunto de colores característicos de su composición y estado. El análisis de esa luz se llama espectroscopía. Actualmente, hay diversos grupos de científicos que utilizan la espectroscopía para estudiar materiales, partículas, gases, reacciones químicas, etc. Además, los materiales pueden reflejar la luz de una forma muy particular que no tiene que ver con su composición o estado, sino con la estructura sub-microscópica de su superficie. Ese es el caso de algunos escarabajos o mariposas cuyos colores son iridiscentes. Esas estructuras naturales son estudiadas por nuestros científicos para comprenderlas y, potencialmente, aplicarlas en desarrollos tecnológicos.

Y si de iluminar y reflejar se trata, la iluminación de nuestros hogares, de las calles, rutas y autopistas, es un tema que ocupa a muchos científicos y tecnólogos. Hay científicos que continuamente estudian cuál es el mejor tipo de iluminación para desempeñarnos en las tareas hogareñas, ya sea estudiar, cenar o disfrutar de un momento en familia. Al mismo tiempo, hay tecnólogos encargados de desarrollar y fiscalizar los esquemas de iluminación exterior para hacer un uso racional de la energía sin comprometer la seguridad de transeúntes ni automovilistas.

Esto y mucho más es lo que ocupa a científicos y tecnólogos que trabajan en temas relacionados con la luz con una dedicación denodada hacia un único objetivo: ¡trabajar para mejorar la calidad de vida de todos los argentinos!



Ilustra: Juan Carlos Chaves

Epílogo

La pequeña llama. Fragmento del poema de Juana de Ibarbouru (1998).

*Yo siento por la luz un amor de salvaje.
Cada pequeña llama me encanta y sobrecoge.
¿No será, cada lumbré, un cáliz que recoge
El calor de las almas que pasan en su viaje?*

Más allá de lo que pueda decir la ciencia, la luz nos fascina e interpela. Pocas cosas son tan cotidianas como ella y mantienen la capacidad de maravillarnos.

Artistas, artesanos, científicos, niños, adultos. Todos tenemos nuestras experiencias con la luz y algo que decir sobre ella.

En estas frases que formaron parte de la muestra “Hágase la luz”, que presentó la Red de Museos de la UNLP en el marco del Año Internacional de la Luz (2015), podemos encontrar algunos ejemplos de ello:

Así, en una biblioteca podemos pensar “que mediante la luz de una vela, una linterna, un farol, una lámpara o una pantalla, accedemos a los mundos de los libros y sus travesías”. Y en un taller de arte decir que “la luz favorece la creación de la obra de arte dándole un nuevo sentido y, a la vez, facilita la interpretación de la misma”.

Alguien que trabaja con vida vegetal entenderá que “la luz mantiene la vida en la Tierra, y la fotosíntesis transforma tanto la superficie como la atmósfera”.

Mientras quienes se ocupan de la vida animal resaltarán que “la importancia de la luz excede los límites del pensamiento; para los animales, entre tantas funciones, la luz es fundamental en los procesos de relación con el medio, relación entre pares, reproducción y elaboración de nutrientes.”

Un niño puede proponer que la luz “es algo que ilumina, puede ser el sol o la luz artificial, por ejemplo una linterna, también luz puede dar una luciérnaga, etc. Pero la luz ilumina, o sea que hace que se vaya la oscuridad”. Y al mismo tiempo, un astrónomo propone que “los instrumentos astronómicos son la materialización de la inteligencia y el esfuerzo de la Humanidad para leer las infinitas historias que la luz puede contar”.

Infinidad de preguntas y respuestas, infinidad de miradas y enfoques, infinidad de curiosidades. Esperamos que hayan disfrutado de este libro en el que hemos intentado recopilar algo de esta infinidad de la mirada propia de los físicos.

Referencias

- Abramson, G. (2012) “En el cielo las estrellas, una visión personal del universo y la astronomía”, <http://guillermoabramson.blogspot.com.ar/2012/05/el-color-del-sol.html> (último acceso 7/9/2015).
- Bergero, P. (2008) Historias con rayos que hicieron historia. http://museo.fisica.unlp.edu.ar/uploads/docs/rayos_que_hicieron_historia.pdf
- Borges, J. L. (1974). Obras Completas. Buenos Aires. Editorial Emecé.
- Bruis, L. et al. (2015). Ciencia & Tecnología para la Salud Visual y Ocular, 13(1), 11-43. Por Argentina: Laura Brusi, Lady Argüello, Agustín Alberdi, Javier Bergamini, Florencia Toledo (Universidad de La Plata). Informe de la salud visual y ocular de los países que conforman la Red Epidemiológica Iberoamericana para la Salud Visual y Ocular (REISVO), 2009 y 2010. Bruis, L. et al. (2015). Ciencia & Tecnología para la Salud Visual y Ocular, 13(1), 11-43.
- Cortázar, J. (1951) Bestiario. Buenos Aires. Editorial Sudamericana.
- de Azúa, M (2000). (traductor) Revista Ciencia Hoy en línea, Volumen 10 - Nº 58 Agosto/Septiembre.
- de Ibarbourou, J. (1998a). Las lenguas de Diamante. Madrid. Letras Hispanas. Ediciones Cátedra.
- de Ibarbourou, J. (1998b). Obras escogidas. Santiago de Chile. Editorial Andrés Bello.
- Domínguez Pena, S. (2007). “Realidad y leyenda del mal de ojo”. Revista Sociedad Española de Estudios Literarios de Cultura Popular (SELICUP), V.7. España.
- Divididos (2000). “Par Mil”. En: Narigón del siglo. Discográfica: EMI
- Drexler, Jorge. (2010). Noctiluca. En: Amar la trama. Discográfica: Warner Music Spain.

- Driver, R., Guesne, E. y Tiberghien, A. (1998). Ideas científicas en la infancia y la adolescencia. Madrid. Ed. Morata.
- Fandermole, J. (2005). Diamante. En: Pequeños Mundos. Discográfica: Shagrada Medra.
- Horizon - BBC (1981): "Richard Feynman - The Pleasure of Finding Things Out".
- Galeano, E. (1993^a). "El mundo". El libro de los abrazos. Buenos Aires. Editorial Siglo XXI.
- Galeano, E. (1993^b). "El mar". El libro de los abrazos. Buenos Aires. Editorial Siglo XXI.
- Giribet, G. (2012). Portal de noticias científicas CienciaNet <http://ciencianet.com.ar>, (último acceso 7/9/2015).
- Hernández, F. (1947). El acomodador. Buenos Aires. Editorial Sudamericana.
- Jou, D, Baig, M. (1993). La Naturaleza y el paisaje. Barcelona. Editorial Ariel, S. A.
- La máquina de hacer pájaros (1976). Ah, te vi entre las luces. En: La máquina de hacer pájaros. Discográfica: Talent Microfón.
- Mujica Láinez, M. (1976). Aquí vivieron. Buenos Aires. Editorial Sudamericana.
- Ocampo, S. (2006). Cuentos completos I. Buenos Aires. Emecé.
- Páez, F. (1988). Polaroid de locura ordinaria. En: Ey! Discográfica: EMI Music.
- Storni, A (1918). El dulce daño. Buenos Aires. Soc. Cooperativa Editorial Limitada.
- Vox Dei (1971). Detrás del Vidrio. En: Jeremías pies de plomo. Discográfica: Disc Jokey.
- von Reichenbach, M.C. (2006) Revista Museo, volumen 3, N° 20.

Bibliografía de consulta

- Historia de la Luz. Susana Gallardo. Capital Intelectual. México 2010.
- Cero Absoluto – Curiosidades de Física. von Reichenbach, M. C. (2ª edición). La Plata. Editorial IFLP-CONICET, (2009).
- Manual de Cocinas Solares, Andrés Fasano, Carlos Secco, Museo Puerto Ciencia, Universidad Nacional de Entre Ríos. Edición digital, 2003.
- Perspectiva ambiental Nº 25 - Cocina solar. Disponible en [www. ecoterra.org](http://www.ecoterra.org). Fundación Tierra, Barcelona 2002.
- Experimentos de óptica para la Escuela Media. Una propuesta para llevar la ciencia a la Escuela. Guía para docentes. Laura Estrada y Andrea Bragas. Color y polarización. Exactas con la Sociedad. Departamento de Física J. J. Giambiagi, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales Universidad de Buenos Aires. 2007.
- ¿A dónde se fue la luz? Guadalupe Lydia Alvarez Camacho, Jesús M. Siqueiros Beltrones. Revista Universitaria- UABC No. 48, 2004- UNAM.
- La ciencia del color - Historias y pasiones en torno a los pigmentos. Ana von Rebeur. Editorial Siglo Veintiuno, Colección “Ciencia que ladra...”. 2010.
- Polo Sur – Experiencias de Electromagnetismo. Florencia Cabana, Santiago Games. Paula Bergero, Cecilia von Reichenbach (comp.) La Plata. Editorial IFLP-CO- NICET. 2010.

Este libro se terminó de imprimir
en Gráfica Dasa, 37 N° 992 e/ 14 y 15
La Plata, Bs. As.
Noviembre de 2015

El 2015 fue declarado por la Asamblea General de las Naciones Unidas como Año Mundial de la Luz y las Tecnologías Asociadas, con el objetivo de celebrar este maravilloso fenómeno y concientizarnos sobre su impacto en nuestra vida cotidiana y la cultura. Con este libro -escrito por tres de sus docentes- el Museo de Física de la Facultad de Ciencias Exactas de la de la Universidad Nacional de La Plata (UNLP) se suma a las conmemoraciones.

Luz Verde fue escrito pensando en personas curiosas pero no especializadas, con el deseo de que sea de interés para aquellos docentes que buscan motivar a sus estudiantes en el aprendizaje de la física.

Los contenidos aparecen en este libro abordados desde una perspectiva cultural, histórica y fenomenológica, y están acompañados de producciones artísticas que las autoras hemos considerado de alguna manera relacionadas con la luz. También ofrecemos aquí información sobre investigaciones científicas en temas de óptica que se realizan en nuestro país.

Intentamos además proponer miradas creativas sobre las mismas manifestaciones de la luz, para lo cual contamos con colaboradores especialistas en física y en disciplinas tan variadas como historia, artes plásticas, literatura y didáctica. Además, Luz Verde fue ilustrado por artistas platenses que han extendido nuestras palabras a otros lenguajes.

Cuenta también con un suplemento digital en Internet con material extra, donde pueden encontrarse ilustraciones, fotografías, propuestas de actividades y un repertorio de instrucciones detalladas para la construcción de varios instrumentos demostrativos.

Con Luz Verde invitamos a los lectores a recorrer un camino de ideas e historias sobre la luz.



Facultad de
Ciencias Exactas
SECRETARÍA DE EXTENSIÓN



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

ISBN 978-987-24485-7-8

