

LAS CEBRAS DE LA FÍSICA CUÁNTICA

*A la luz le gusta dibujar cebras al cruzar sigilosa por las rendijas,
y mover electrones al pasar por los átomos.*

ELÍAS MANJARREZ

Las Naciones Unidas proclamaron este 2025 como el año Internacional de la Ciencia y la Tecnología Cuánticas. Por ello, es casi seguro que veremos artículos conmemorativos de este tema en todas partes.

Aquí comparto con ustedes una breve reflexión sobre el impacto trascendental del espectrómetro y el fenómeno de interferencia, como elementos clave que permitieron a Max Planck y Albert Einstein establecer las bases de la física cuántica.

Elegí el espectrómetro porque vive en las sombras de los textos de divulgación del tema, donde muy a menudo se privilegia la fascinación por lo inexplicable, a veces con palabras que, lejos de esclarecer, confunden aún más al lector. Dichos textos son como un aromático helado que se le regala a un niño, sin la posibilidad de que pueda saborearlo.

Describir qué es una balanza o un termómetro, nos ayuda a entender lo que es la fuerza o la temperatura. Explicar lo que es un calorímetro con sus aspas en un balde de agua, y un termómetro, nos ayuda a entender lo que es la temperatura y su relación con el trabajo mecánico. Del mismo modo, visualizar lo que es un espectrómetro ayuda a entender los orígenes de la física cuántica. De otro modo, solo percibimos un mundo abstracto con el gato de Schrödinger vivo y muerto al mismo tiempo, difícil de comprender. A este último tema regresaré al final.

El espectrómetro es uno de los inventos más relevantes de la historia de la humanidad que revolucionó la física y la química. Su perfeccionamiento requirió de la sagacidad y paciencia de muchos genios, como Newton, Wollaston, Young, Fraunhofer, Bunsen y Kirchhoff, entre otros. Planck y Einstein, con su genio teórico, lograron encajar las piezas del rompecabezas que durante un siglo habían sido reunidas.

La palabra espectro proviene del latín *spectrum*, que significa *imagen o aparición*. Por ello, Newton usó por primera vez esta palabra en la física para referirse a la gama de líneas coloreadas del arcoíris que emergen cuando la luz pasa a través de un prisma. De manera similar, el espectrómetro es un dispositivo que permite observar las líneas espectrales de la luz que cruza por sus componentes ópticos. La explicación más básica del funcionamiento del espectrómetro es que aprovecha el fenómeno físico de difracción de la luz.

La difracción consiste en la dispersión de una onda cuando se encuentra un obstáculo o una apertura. Su característica más representativa es que la onda tiende a rodear el obstáculo o la apertura, generando una nueva propagación. Por ejemplo, cuando dos o más ondas en el agua pasan por dos aperturas tipo rendija, dan origen a una mezcla de las ondas.

La palabra espectro proviene del latín *spectrum*, que significa *imagen o aparición*. Por ello, Newton usó por primera vez esta palabra en la física para referirse a la gama de líneas coloreadas del arcoíris que emergen cuando la luz pasa a través de un prisma. De manera similar, el espectrómetro es un dispositivo que permite observar las líneas espectrales de la luz que cruza por sus componentes ópticos.

Dicha combinación puede ser constructiva, cuando las ondas se refuerzan, o destructiva, cuando se anulan entre sí. Como consecuencia, ello genera en el agua un patrón de interferencia con zonas oscuras y claras, como en la piel de las cebras. Algo similar ocurre con cualquier tipo de ondas, como las de la luz visible, en que las bandas aparecen de manera alternada con colores. Los lectores pueden buscar en YouTube las frases *difracción de ondas de agua* o *difracción de la luz* y encontrarán muchos videos ilustrativos.

El espectrómetro no solo permite hacer observaciones cualitativas de la descomposición de la luz en sus componentes lumínicos de difracción, sino que también permite hacer mediciones de sus longitudes de onda. Pero, ¿cómo este aparato permite hacer la medida de las longitudes de onda? El procedimiento es simple: este dispositivo mide la separación entre líneas de colores del espectro y hace un cálculo para inferir las longitudes de onda. La fórmula que se emplea en dicho cálculo requiere medidas de los aspectos geométricos de rejillas, ángulos y distancias de la propagación de la luz, entre otros parámetros.

La forma más simple de espectrómetro son dos rendijas paralelas muy delgadas ordenadas en forma de rejilla, las cuales permiten el paso de la luz y su difracción en una pared. Con esta doble rendija, es posible observar en la pared un patrón de líneas luminosas separadas dependientes del color de luz.

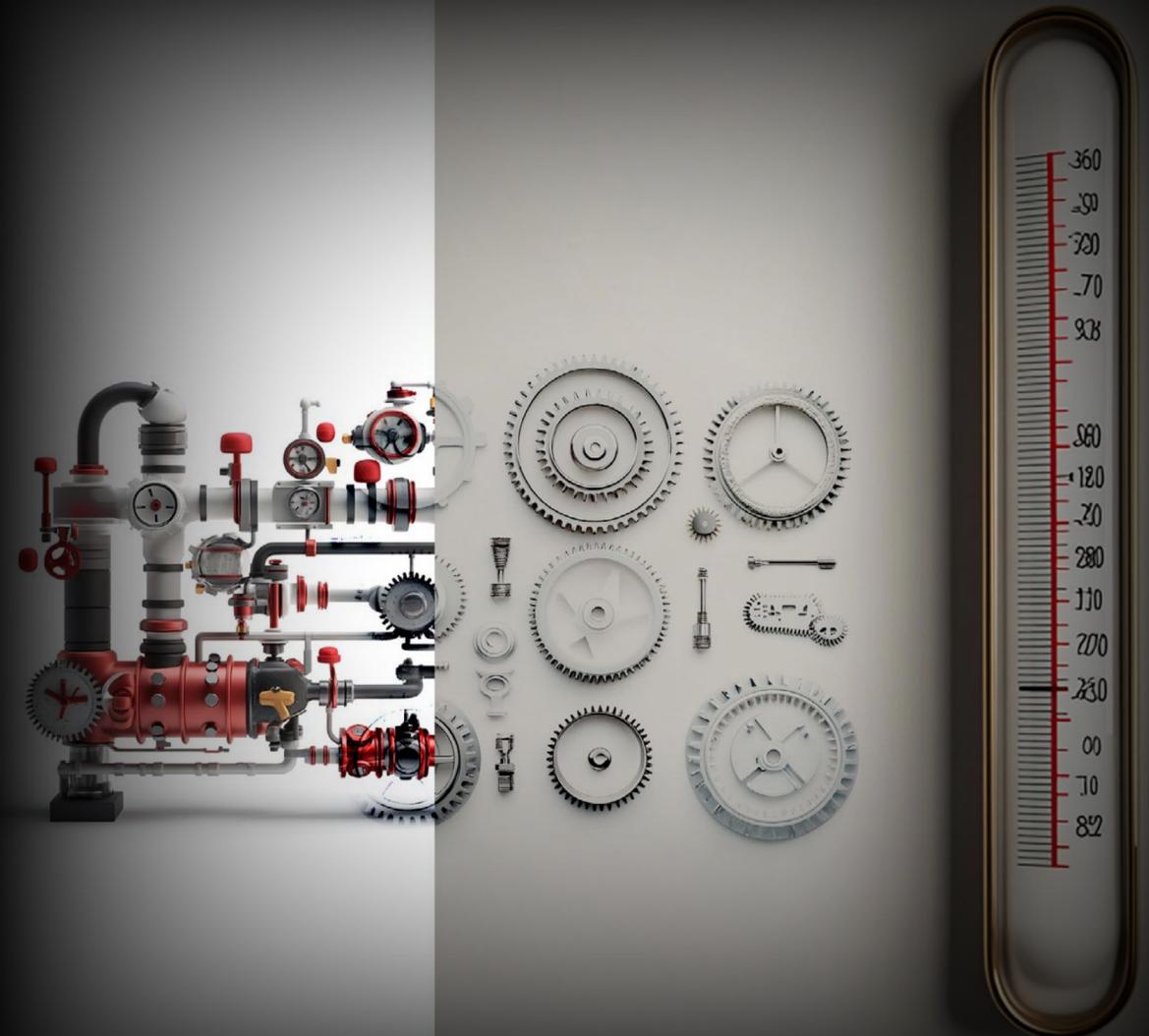
Por ejemplo, si se proyecta un haz de luz roja sobre la rejilla se observa una separación mayor entre líneas rojas luminosas en la pared. En cambio, si se hace pasar una luz azul, entonces la separación entre líneas azules es menor. La separación entre líneas en la pared es directamente proporcional a la longitud de onda de cada haz de luz.

Los espectrómetros usan un principio similar de separación entre líneas de colores para inferir con precisión la longitud de onda. Emplean una fórmula de triangulación, como se explicó en el párrafo anterior. De esta manera, los físicos calcularon que la luz visible tiene longitudes de onda que van del violeta (de unos 400 nanómetros) al rojo (de unos 700 nanómetros).

Exploraciones arqueológicas de la antigua Roma revelan el uso de los prismas desde tiempos ancestrales (Rossi y Russo, 2017). Sin embargo, Newton (en 1665) y Wollaston (en 1802) resaltaron su utilidad.

La forma más simple de espectrómetro son dos rendijas paralelas muy delgadas ordenadas en forma de rejilla, las cuales permiten el paso de la luz y su difracción en una pared. Con esta doble rendija, es posible observar en la pared un patrón de líneas luminosas separadas dependientes del color de luz.

En cuanto al uso de rejillas, fue Young quien, en 1801, demostró la naturaleza ondulatoria de la luz con el experimento de la doble rendija usando luz solar. En 1814, Fraunhofer combinó el uso de rejillas, prismas y lentes, con lo que inventó el primer espectrómetro para mirar al sol. La posterior mejora de este dispositivo permitió medir con precisión la longitud de onda de la luz.

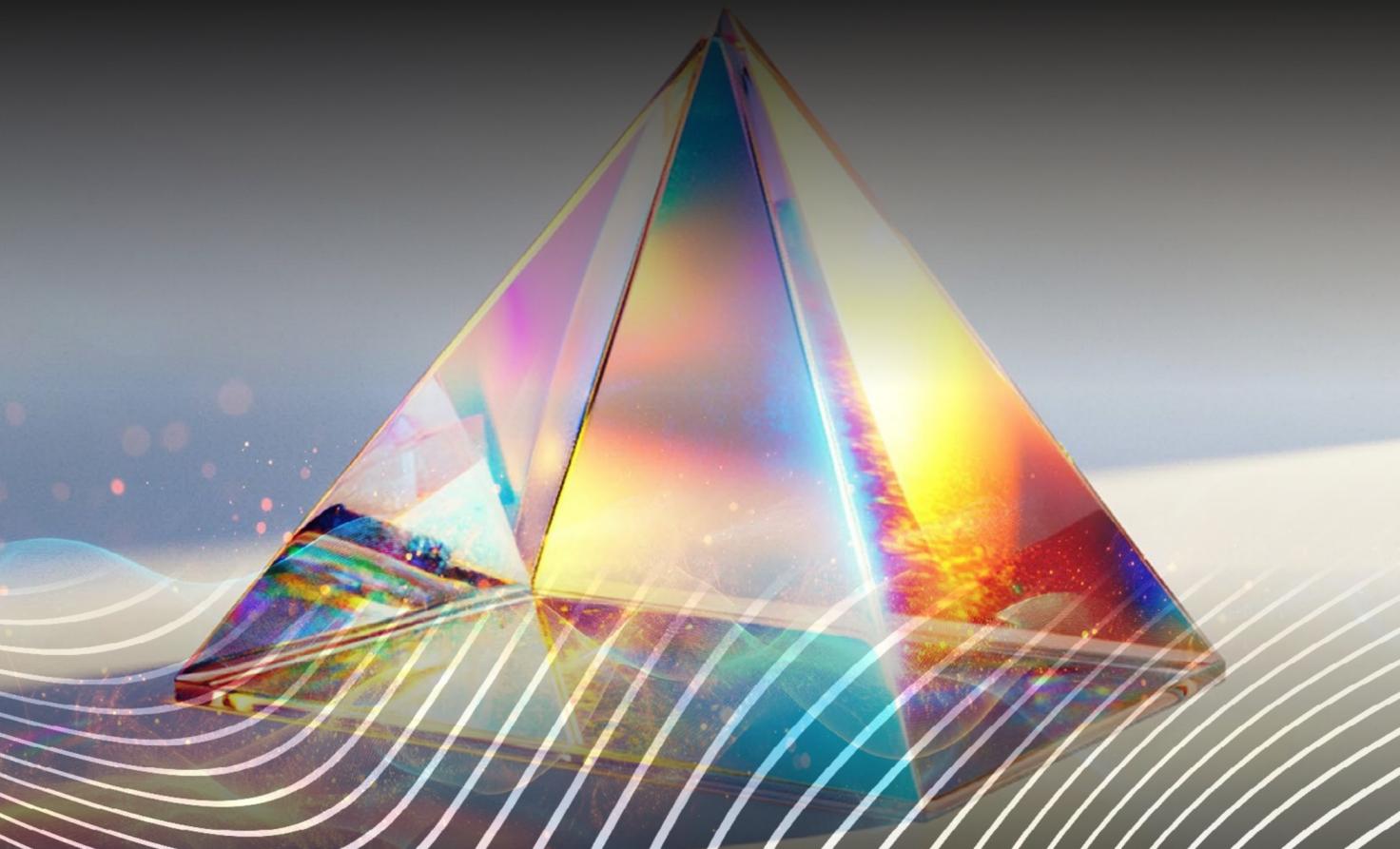


En 1859 Kirchhoff y Bunsen perfeccionaron el espectrómetro e identificaron líneas espectrales que son únicas para cada elemento químico. En sus experimentos solían poner fuego a diversos elementos químicos puros y observar con el espectrómetro las líneas fijas de luz que ellos emitían al quemarse, ¡algo muy ingenioso!

Usaron el espectrómetro como un escáner de supermercado, en que cada elemento químico emitía un código de barras luminoso, único e inconfundible. Se empezó a caracterizar y descubrir todo tipo de elementos químicos en nuestro planeta, e incluso del sol y las estrellas. Solo se requería el mensaje espectral de la luz para saber su composición. Como se podrán

imaginar los lectores y lectoras, esto produjo una revolución en la física, la química y la astronomía, que más tarde llevó a crear las teorías de la constitución atómica de la materia.

Kirchhoff y Bunsen pensaron que los componentes de un elemento puro pueden emitir una luz característica, propia de dicho elemento cuando se queman. Por lo tanto, trasladaron ese razonamiento al de la luz liberada por un cuerpo negro caliente, como cuando un carbón exhibe una luz roja o azul. Así, la luz comenzó a entenderse como energía radiante ligada a la temperatura de la materia. A dicha emisión de energía le llamaron la radiación del cuerpo negro.



Por aquel tiempo, en 1865, Maxwell publicó las ecuaciones que describen la interacción entre la electricidad y el magnetismo. Propuso la teoría de que la luz es una onda electromagnética. En 1888, Hertz confirmó esta hipótesis de Maxwell de manera experimental, por lo que quedaba claro que la radiación del cuerpo negro eran emisiones de ondas electromagnéticas en el rango visible e invisible de la luz. Así, los hallazgos de Kirchhoff y Bunsen adquirieron un nuevo significado que más tarde aprovechó Max Planck.

Pasaron doce años para que llegara otro gran descubrimiento. En 1900, Max Planck demostró, con rigor teórico e interpretación experimental, que la radiación del cuerpo negro medible con un espectrómetro se compone de paquetes o cuantos de energía. Planck llegó a esta conclusión a partir de analizar las curvas experimentales de la radiación del cuerpo negro y del concepto de entropía de Ludwig Boltzmann. Encontró que la cantidad empaquetada de energía, el quantum de luz, es igual al producto de la constante de Planck por su frecuencia de oscilación; donde la frecuencia de oscilación es el cociente entre la velocidad de la luz y la longitud de onda medida con el espectrómetro.

La propuesta de Planck llevó a Albert Einstein, en 1905, a proponer el efecto fotoeléctrico. Este efecto se refiere a que los fotones son cuantos de luz, como los descritos por Planck, que interactúan con los electrones para liberarlos de los átomos. Esta propuesta tiene su contraparte lógica si se usa el principio de conservación de la energía.

En 1865, Maxwell publicó las ecuaciones que describen la interacción entre la electricidad y el magnetismo. Propuso la teoría de que la luz es una onda electromagnética. En 1888, Hertz confirmó esta hipótesis de Maxwell de manera experimental, por lo que quedaba claro que la radiación del cuerpo negro eran emisiones de ondas electromagnéticas en el rango visible e invisible de la luz.

Si los fotones pueden impactar sobre los electrones para moverlos, entonces, los electrones también deberían generar fotones. Tal vez, Bohr pudo imaginar que, como lo evidenciaron Kirchhoff y Bunsen, al quemar los compuestos químicos se lograba separar fotones medibles con el espectrómetro.

Ello motivó a Bohr a proponer un modelo atómico, en que los saltos de energía de los electrones en los átomos son los creadores de la luz. A estos cambios discretos de energía también se les denomina fotones, cuantos de energía, o quantum de luz. Un quantum es una cantidad empaquetada de energía igual al producto de la constante de Planck por su frecuencia de oscilación.

La teoría de Planck tuvo una influencia en Louis de Broglie, quien en 1923 propuso la hipótesis de la dualidad-onda partícula: cuando los electrones cruzan la doble rendija se comportan como ondas. En 1927, Davisson y Germer verificaron de manera experimental esta brillante propuesta.

La naciente teoría cuántica también influyó a Schrödinger, quien en 1926 propuso una ecuación del comportamiento ondulatorio de los electrones en el átomo. Estos descubrimientos revelaron uno de los conceptos fundamentales de la física cuántica: la luz, los electrones, y otras partículas elementales, exhiben una dualidad onda-partícula.

Empezó a quedar claro que la luz, o las partículas más elementales, se comportan como ondas o como partículas, dependiendo del tipo de experimento que intente identificarlas. Por ejemplo, la luz se comporta como onda en el experimento de la doble rendija de Young. En contraste, la luz se comporta como partícula en el experimento del efecto fotoeléctrico de Einstein.

Esta idea de la dualidad onda-partícula, en que la luz es onda o partícula, dependiendo del tipo de experimento que se haga, llevó a Schrödinger a idear un experimento mental. Un gato encerrado en una caja junto a un veneno puede estar vivo o muerto (en un estado de superposición). Solo el observador, al abrir la caja, es el que permite saber el estado del gato.

Esta idea de la dualidad onda-partícula, en que la luz es onda o partícula, dependiendo del tipo de experimento que se haga, llevó a Schrödinger a idear un experimento mental. Un gato encerrado en una caja junto a un veneno puede estar vivo o muerto (en un estado de superposición). Solo el observador, al abrir la caja, es el que permite saber el estado del gato.

Muchas veces no se entiende este experimento del gato de Schrödinger. Pero es algo sencillo de interpretar: el proceso de *abrir la caja* se refiere al proceso de *realizar un tipo de experimento*, como el de Young o el de Einstein. El gato estará *vivo* o *muerto* con una misma probabilidad del 50%, dependiendo del experimento (el observador). En esta metáfora antropomórfica, el estado *vivo* podría ser la onda y el estado *muerto* la partícula.

La teoría de Planck permitió conocer que la luz tiene propiedades de onda, pero también de cuantos de energía electromagnética que abarcan la luz no visible y los colores del arcoíris, cada uno con una frecuencia de oscilación diferente. Desde el violeta al rojo, donde el violeta tiene la mayor frecuencia y energía con respecto al rojo.

Por otro lado, la luz no visible con alta frecuencia y energía por arriba del violeta, incluye al ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma. La luz no visible con

baja frecuencia y energía por abajo del rojo incluye al infrarrojo, las microondas y las ondas de radio.

La naturaleza ondulatoria de la luz se revela con elegancia al atravesar la doble rendija, desplegando el fenómeno de la difracción. En ese sencillo experimento, la luz esculpe sobre la superficie de una pared un juego de líneas espectrales entrelazadas, similares a los contrastes que adornan la piel de las cebras.

Por otro lado, la naturaleza granular de la luz, en forma de partícula, exhibe su naturaleza cuántica de paquete de energía, como en el fenómeno fotoeléctrico descubierto por Einstein, en que la forma granular de la luz le permite mover electrones al pasar por los átomos. Así, el espectrómetro jugó un papel protagónico en el nacimiento de la mecánica cuántica al revelar la dualidad onda-partícula, en que la luz emerge de la materia atómica o vuelve a ella, ya sea en forma de partícula o de onda.

Me gusta imaginar que la mecánica cuántica nació de observar más el negro que el blanco. Newton tomó la luz blanca para pasarla por un prisma y obtener el visible arcoíris. Planck tomó todas las formas de luz del cuerpo negro caliente y así obtener los cuantos de toda la luz visible e invisible al ojo humano.

Esto me recuerda el célebre poema de Shakespeare de "días son las noches que te sueño". Que dice algo así: "Mis ojos ven mejor si están cerrados, así no se distraen con simpatías; mas al dormir, te ven en sueños claros y brillan en lo oscuro como estelas."

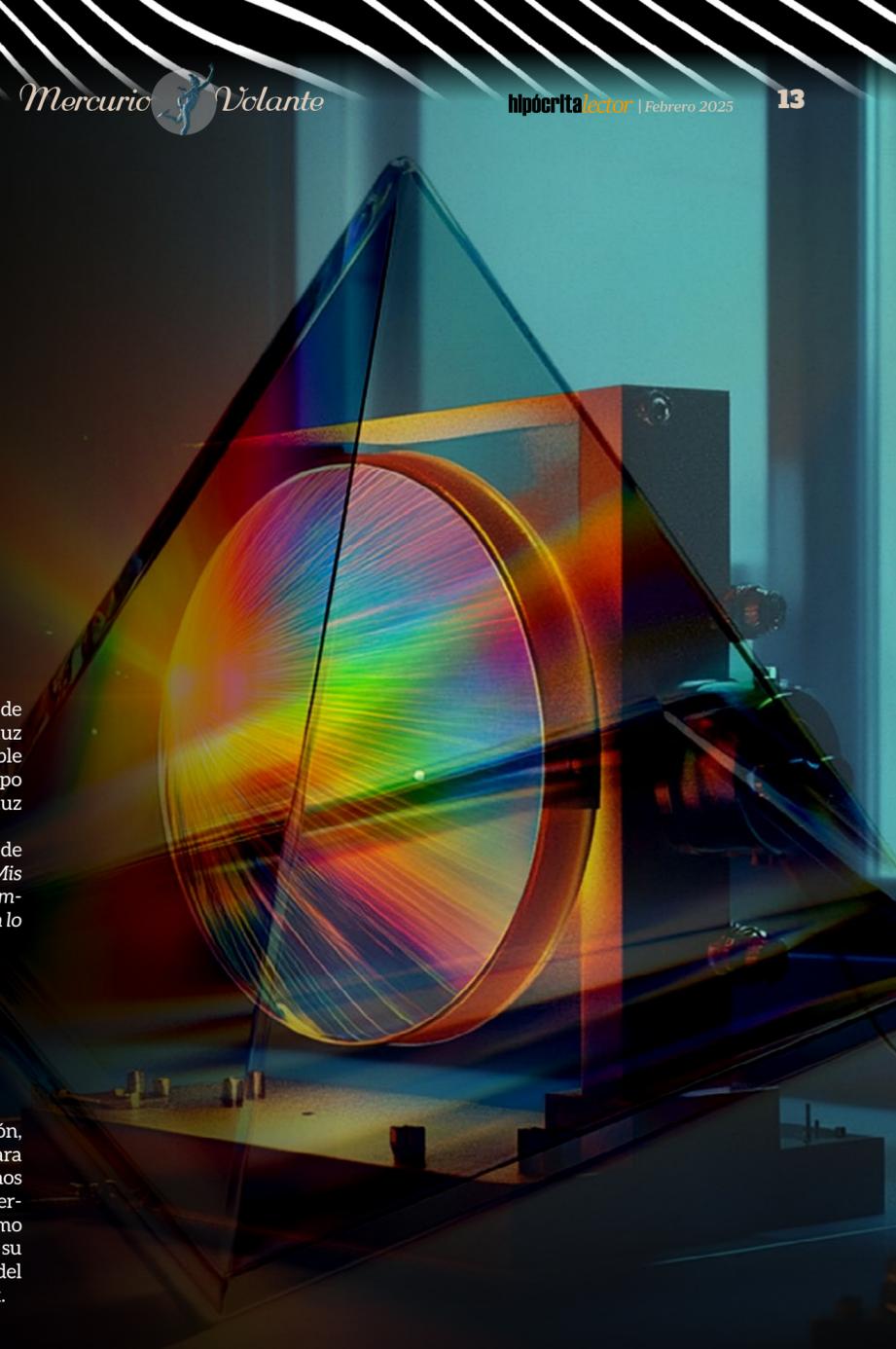
*Nights Become Days When I Dream of You.
When most I wink, then do mine eyes best see,
For all the day they view things unrespected;
But when I sleep, in dreams they look on thee,
And darkly bright, are bright in dark directed.*

El espectrómetro, fruto de la paciencia y la precisión, nos enseñó que la luz es mucho más que un medio para dibujar líneas espectrales, mover electrones, o mirarnos en los espejos durante el día. Reveló que la luz es una energía cuántica de naturaleza dual de *onda* y *partícula*, como una moneda de dos caras. La luz recelosa de revelar su interior delató su esencia más íntima al salir, sigilosa, del prisma blanco de Newton y del horno negro de Planck.

ELÍAS MANJARREZ

Profesor investigador titular, responsable del laboratorio de Neurofisiología Integrativa del Instituto de Fisiología, BUAP. Es físico de formación, con maestría en fisiología y doctorado en neurociencias. Obtuvo su doctorado en el departamento de Fisiología, Biofísica y Neurociencias del Cinvestav.

Sus líneas de investigación están enfocadas a entender propiedades emergentes de ensamblajes neuronales en animales y humanos. Es pionero en el estudio de la resonancia estocástica interna en el cerebro, la propagación de ondas en ensamblajes neuronales espinales, la hemodinámica funcional de las emociones, así como de los mecanismos neuronales de la estimulación eléctrica transcraneal. Recibió el Premio Estatal de Ciencia y Tecnología del CONCYTEP y ha recibido el premio Cátedra Marcos Moshinsky. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores Nivel 3.



REFERENCIAS:

- Cesare Rossi y Flavio Russo, Ancient Engineers' Inventions: Precursors of the Present. (2nd ed.) Cham, Switzerland: Springer International, p. 335. (2017). ISBN 978-3-319-44476-5
- <https://www.sciencehistory.org/education/scientific-biographies/robert-bunsen-and-gustav-kirchhoff/>
- <https://www.accessscience.com/content/briefing/aBR0213171>
- <https://penguinrandomhouselibrary.com/book/?isbn=9788439736080>
- Haz el experimento de la doble rendija en tu casa.
- <https://www.youtube.com/watch?v=l2r9DtKqp1w>