

Huele a música cuántica

W. LUIS MOCHÁN

El Dr. W. Luis Mochán Backal es investigador del Instituto de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Autónoma de México y Miembro de la Academia de Ciencias de Morelos

Esta publicación fue revisada por el comité editorial de la Academia de Ciencias de Morelos.

Lo estoy engañando

Si está leyendo este artículo en la pantalla de una computadora o de un teléfono, seguramente está siendo engañado. Si lo está leyendo en papel, tal vez también. Si ve el lado izquierdo de la figura 1 creará ver un cuadro amarillo, pero ese cuadro no existe en la pantalla de su computadora. Lo que en realidad está viendo son muchos cuadros minúsculos rojos y verdes, como ilustra el lado derecho de la misma figura, que engañan a sus receptores y le hacen creer que ve el amarillo. El auténtico color amarillo corresponde a una onda electromagnética que oscila alrededor de 515 millones de millones de veces cada segundo, es decir, con una frecuencia de 515×10^{12} hertz o 515 terahertz.

Pero los pigmentos en nuestros conos, los receptores de luz diurna en la retina de nuestros ojos, responden de forma similar a la luz amarilla pura que a una mezcla de luz roja y verde, con frecuencias de alrededor de 440 terahertz y 550 terahertz respectivamente. Para confirmar lo que le digo, basta con que consiga una lente de aumento y vea de cerca la pantalla de su celular. A falta de una lente de aumento, coloque con cuidado una pequeñísima gota de agua sobre su superficie, mientras más pequeña mejor (limpiela inmediatamente después). A través de ella podrá ver ampliados los pequeños píxeles (elementos de la imagen) de colores rojo, verde y azul, pero no verá ningún pixel amarillo, magenta o cian, y tampoco verá un pixel blanco. Las limitaciones de nuestro ojo para ver el verdadero color de las cosas fue discutido en la referencia (1) que fue publicada en este mismo espacio.

La vista es un sentido maravilloso y nos permite localizar objetos y fuentes luminosa en el espacio con una gran precisión, así como detectar los movimientos más pequeños, pero es un sentido fácil de engañar. En la referencia (2) hay una larga lista de ilusiones ópticas sorprendentes.

El sonido
Nuestra percepción del sonido es diferente. Si uno toca en un piano la nota L_a con un tono de 440 hertz (figura 2), una frecuencia 10^{12} veces más lenta que la del color rojo, y simultáneamente toca un D_o sostenido, con una frecuencia de 554.5 hertz, aproximadamente 10^{12} veces más lenta que las oscilaciones correspondientes al color verde, uno no escucharía una nota S_i , con una frecuencia de 493.9 hertz, una nota D_o con una frecuencia de 523.3 hertz ni una nota intermedia como un D_o desafinado con una frecuencia 10^{12} veces más lenta que la luz amarilla. Lo que uno escucha es lo que los músicos llamarían un acorde de tercera mayor consistente de dos notas, no una nueva nota mezclada que imita a alguna otra nota pura. El oído puede distinguir una nota pura de un acorde formado por dos, o tres, cuatro o incluso más notas distintas que suenan simultáneamente, y con un poco de entrenamiento, puede analizar el sonido distinguiendo cada una de sus componentes individuales. Algún amigo con un poco de entrenamiento musical le podría mostrar la gran variedad de acordes, triadas y tetradas con nombres como mayores, menores, séptimas, disminuidas, semi-disminuidas, aumentadas o alteradas, consonantes y disonantes.

Seguramente, usted puede distinguir un mismo tono musical producido en un piano del mismo tono producido por una guitarra, un violín o una flauta, pues difieren en timbre, atributo relacionado con lo que los físicos llamamos el contenido espectral del sonido, el volumen relativo de cada tono puro en la mezcla de sonidos que contiene todo sonido (vea las referencias (3) y (4)). El timbre nos permite distinguir cada uno de los instrumentos de una orquesta y analizar las distintas líneas melódicas con que contribuyen a una obra sinfónica. Tam-



FIGURA 2: PARTE central de un piano indicando con círculos de colores las teclas que producen los sonidos a que se refiere el texto: de izquierda a derecha, L_a , S_i , D_o y D_o sostenido.

bién nos permite identificar los fonemas en las palabras que escuchamos y nos permite saber quién habla. Entre amigos, usted puede mantener una conversación con uno de ellos aunque todos los demás estén hablando al mismo tiempo. Esto se debe a la capacidad de nuestro sistema auditivo de analizar en todo tiempo todas las frecuencias que componen todo sonido que entra a nuestros oídos. La figura 3 muestra un espectrograma de un canto de un clarín jilguero *Myadestes occidentalis* recién grabado en una barranca al noroeste de Cuernavaca. El ave se pudo identificar por la intensidad (codificada en color) de las múltiples frecuencias (eje vertical) que cantaba conforme transcurría el tiempo (eje horizontal).

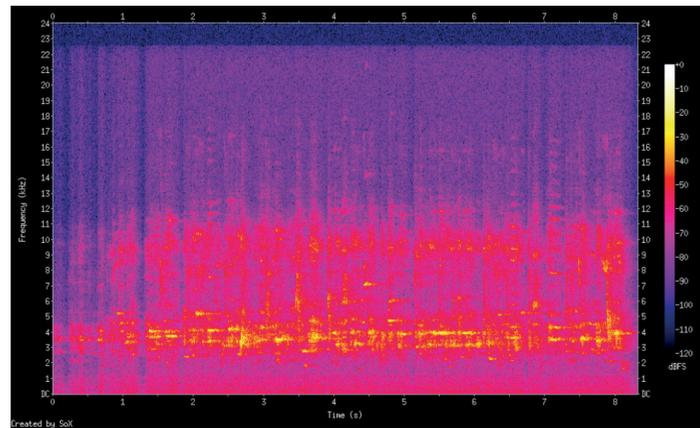


FIGURA 3: ESPECTROGRAMA del canto de un clarín jilguero *Myadestes occidentalis* grabado en las barrancas de Cuernavaca. El color indica la intensidad de cada una de las frecuencias (eje vertical) emitida en cada tiempo (eje horizontal).

El olfato

El olfato es uno de nuestros sentidos menos apreciados, a pesar de ser sorprendente. Gracias al mismo podemos saber sin ver si pasó un repartidor de gas por la calle o un camión recogedor de basu-

ra, si el vecino acaba de cortar el pasto, si el pan acaba de salir del horno, si se está friendo cebolla o quemando un chile en la cocina, si la fruta que deseamos comer ya está madura, si alguien peló una mandarina. Podemos averiguar qué especias se añadieron a la ensalada, el tipo de uva que se empleó para elaborar el vino que tomamos, saber si un amigo lavó su camisa y si la tierra está mojada. Podemos identificar el perfume que se puso una compañera, e incluso podemos saber si nuestra posible pareja es genéticamente compatible. Un perro oliendo a su amo puede saber de dónde viene, con quién estuvo y cómo se siente; una leona marina puede identificar a su cría de entre centenares de cachorros (ver la referencia (5)). Gracias al olfato podemos identificar químicamente a miles de moléculas distintas que forman sustancias volátiles, odorantes, que entran en contacto con el epitelio olfativo en el techo de nuestra cavidad nasal.

Y ¿cómo funciona?

El sentido del olfato es más cercano a nuestra descripción del oído que a nuestra descripción de la vista. El pan caliente y la mantequilla derretida encima huelen a pan con mantequilla, no huelen a chocolate ni a ninguna otra sustancia. Los olores no se promedian como los colores verde y rojo, que nos producen la sensación de un amarillo inexistente. Si se nos presenta una combinación de odorantes, podemos analizar el olor resultante y distinguir sus componentes. Esto nos lleva a preguntarnos, ¿cómo funciona el olfato? Curiosamente, esta es una pregunta muy poco estudiada. Su analogía con el oído nos sugiere que quizás el olfato esté basado en el análisis de frecuencias de vibración, como el sonido; el olfato podría funcionar mediante el análisis espectral (ver figura 3) de las vibraciones de todas las moléculas que entran a nuestra nariz. Esta hipótesis

contrasta fuertemente con la mayoría de las teorías de la percepción, basadas en general en el reconocimiento de la forma tridimensional de las moléculas: las moléculas son como llaves y los receptores como cerraduras que se activan sólo cuando embonan con la llave adecuada

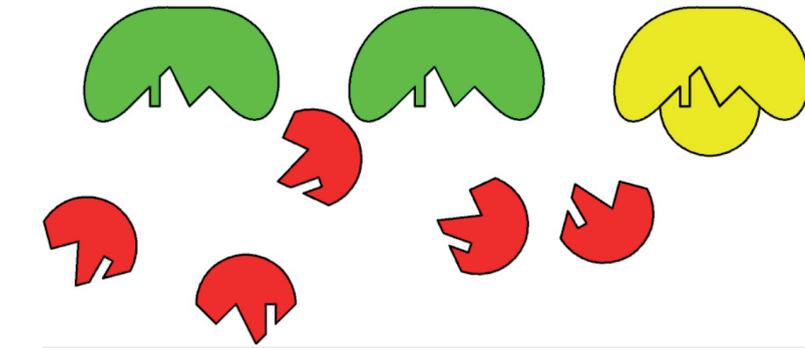


FIGURA 4: MODELO esquemático de llave cerradura. Los receptores (molécula verde) son como cerraduras en cuyos sitios activos sólo pueden embonar llaves (moléculas rojas) con cierta forma. Cuando se une una llave a su correspondiente cerradura se forma un complejo (molécula amarilla).

(ver figura 4).

Cómo vibran las moléculas

Consiga una varilla metálica de alrededor de un metro de largo. Golpéela en un extremo. Escuchará un sonido agudo con una frecuencia de unos 2 o 3 kilohertz. Corte la varilla en dos partes iguales y repita el experimento con una de las mitades. Notará que el sonido se habrá vuelto más agudo, con una frecuencia de unos 4 a 6 kilohertz. Siga cortando y golpéandola la barra repetidamente y notará que la frecuencia sigue duplicándose cada vez. Después de repetir el experimento unas treinta veces notará que la frecuencia habrá subido a unos 2 o 3 terahertz. Bueno, seguramente no logró cortar la varilla treinta veces a la mitad, ni podría escuchar un sonido con frecuencia de terahertz, pero si podrá imaginar mediante una simple extrapolación que si la frecuencia de vibración es inversamente proporcional a la longitud, una molécula que mida alrededor de unos nanómetros, (milésimas de millonésimas de un metro), tendrá una frecuencia de oscilación mil millones de veces más alta que la de una varilla inicial de un metro. Desde luego, nuestro oído no puede escuchar frecuencias tan altas.

Tunelamiento cuántico

La pregunta es, ¿cómo podrían detectarse frecuencias de oscilación tan altas como las que corresponden a vibraciones moleculares? En 1996, Luca Turin propuso que podría ser mediante tunelamiento cuántico inelástico (ver ref. (6)). Para entender qué es esto, busque un parque con columpios, encuentre dos columpios contiguos desocupados, súbase a

uno y comience a mecerse (o pídale a un niño que lo haga). Notará que al poco tiempo, el columpio de al lado comenzará a oscilar. Ahora consiga una guitarra bien afinada y oprima con el dedo índice de su mano izquierda la sexta cuerda (la más gorda) contra el quinto traste (junto a la quinta barra metálica que atraviesa el mango) y púlsela con el índice de su mano derecha. Observe cómo la quinta cuerda se pondrá a oscilar. Este fenómeno se conoce como transferencia resonante de energía y sucede cuando dos sistemas (uno y otro columpio, o una cuerda al aire y otra cuerda en el quinto traste) tienen la misma frecuencia de oscilación (en el último caso, un L_a de 110 hertz) y están acoplados. La energía impartida a uno de ellos puede transferirse al otro y de regreso (una discusión detallada y otros experimentos se hallan en la ref. (7)). Desde el punto de vista cuántico, los electrones se comportan como ondas, por lo cual, si colocamos un electrón en una caja en que pueda oscilar con cierta frecuencia, y colocamos una caja idéntica vacía en su vecindad, el electrón podría desaparecer de una y aparecer en la otra (ver figura 5), así como la energía de vibración de una cuerda puede pasar a otra cuerda cercana si ambas están entonadas a la misma frecuencia. Este fenómeno se conoce como tunelamiento cuántico, y es uno de los muchos misterios cuánticos (para otros, vea la ref. (8)). La frecuencia con que oscila la función de onda electrónica es proporcional a la energía del electrón. Curiosamente, el electrón puede pasar de una caja a la otra aunque no tenga suficiente energía para salir de la primera, como si abriera un túnel

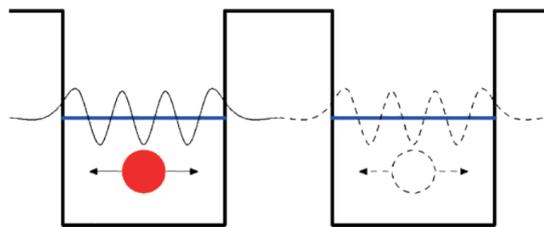


FIGURA 5: TUNELAMIENTO cuántico. Un electrón (círculo rojo del lado izquierdo) encerrado en una caja dentro de la cual se mueve libremente hasta chocar con una barrera de potencial (línea negra recta a trozos) en que rebota, realizando un movimiento oscilatorio (flecha a derecha e izquierda) caracterizado por una función de onda (línea curva continua) y una energía (línea azul) proporcional a su frecuencia. Si cerca hubiese una caja con un nivel de energía idéntico, el electrón podría desaparecer de la primera y tunelear hacia la segunda (líneas a trazos).

en sus paredes. Desde luego, este fenómeno no requiere de cajas. El electrón puede salir de una molécula y tunelear hacia otra molécula donde tenga la misma energía.

Tunelamiento inelástico

Si usted repitiera el experimento mencionado arriba con la guitarra pero presionando el sexto o el cuarto traste en lugar del quinto, notaría que no habría transferencia resonante de energía. En este caso la sexta cuerda ya no oscilaría con la misma frecuencia que la quinta cuerda. Análogamente, un columpio no transferiría su energía a un columpio vecino si tuviera otra longitud. Por lo mismo, un electrón con cierta energía en una molécula no puede tunelear hacia otra molécula con un nivel de energía distinto. Ello violaría la ley de conservación de la energía, algo estrictamente prohibido. Sin embargo, si en la vecindad hubiera alguna molécula capaz de vibrar y la energía vibracional cuantizada fuese exactamente igual a la diferencia de energías entre los niveles electrónicos, podríamos conservar la energía en un proceso de tunelamiento asistido por la vibración molecular: El electrón podría partir de cierta región en que tiene una energía inicial E_i , tunelear hacia otra región en que tendría energía final E_f más pequeña, regalándole la diferencia de energía $\Delta E = E_i - E_f$, a la molécula intermedia, la cual quedaría vibrando con una frecuencia $\nu = \Delta E/h$, donde h es la constante de Planck, como muestra la figura 6. El paso de electrones de uno a otro lado indicaría entonces la presencia de una molécula específica.

Pero, ¿es verdad?

La teoría presentada arriba es bonita y explica de una manera simple cómo puede detectarse tal riqueza de olores distintos. Simplemente, se hace un análisis espectral de las vibraciones de los odorantes, así como el oído puede hacer un análisis espectral de los sonidos cuando escuchamos una sinfonía. Nuestros miles de distintos tipos de receptores diferirían esencialmente en las energías de los niveles entre los que deba tunelear el electrón, lo cual parece más simple que tratar de identificar un sinnúmero de formas moleculares tridimensionales. Es además atractivo ver reflejado en nuestra percepción de la realidad cotidiana un efecto cuántico relativamente sofisticado. Sin embargo, la propuesta de Turin ha despertado fuertes

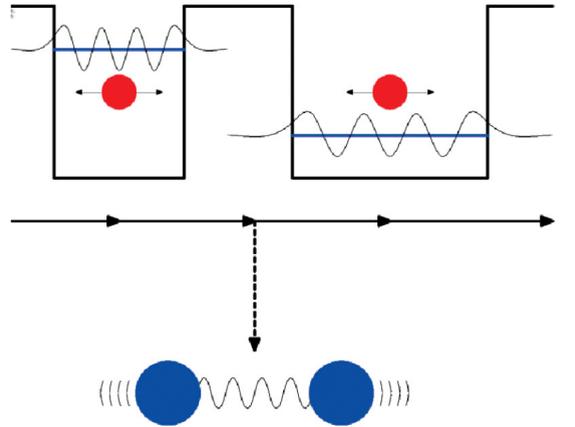


FIGURA 6: PROPUESTA esquemática de receptor olfativo. Un electrón llega (flecha negra) a un extremo de un receptor (caja izquierda) donde tiene una energía relativamente alta, y queda atrapado a menos que excite (flecha a trazos) a una molécula cercana (abajo) cuyas vibraciones absorban justo la energía que pierda el electrón al pasar al otro extremo (caja derecha) de donde puede ser extraído.

polémicas. Hay quien alega que si el olfato respondiera a vibraciones, las mismas moléculas pero con deuterio en lugar de hidrógeno deberían tener olores distintos (el deuterio es idéntico químicamente al hidrógeno, pero más pesado, por lo cual las moléculas deuteradas vibran con menor frecuencia). Algunos experimentos muestran que las moléculas deuteradas sí huelen distinto, pero otros muestran que no. Hay quien dice que los enantiómeros deberían oler igual, pues son moléculas idénticas excepto que una es la imagen en espejo de la otra, como nuestra mano izquierda es la imagen de nuestra mano derecha. Hay experimentos que muestran que los enantiómeros huelen distinto, pero otros muestran que no. Probablemente, la respuesta final será que tanto la forma como el espectro vibracional juegan cierto papel en la percepción. Para seguir la discusión, vea las referencias (9), (10) y (11).

Conclusiones
El funcionamiento del olfato parece ser un misterio aún no descifrado. Una teoría atractiva plantea que el olfato es un efecto mayormente cuántico, asociado al tunelamiento inelástico. Las teorías alternativas suelen estar basadas en la estructura tridimensional de los odorantes y de los receptores. Probablemente ambas tengan algo de cierto. El tema adquirió particular relevancia en el contexto de la pandemia actual, debido a que un síntoma frecuente de Covid 19 es la pérdida del olfato. Recientemente se han descubierto otros fenómenos cuánticos asociados a la percepción. Por ejemplo, las aves migratorias pueden detectar el campo magnético terrestre a través de la oscilación cuántica entre estados de espín de parejas de electrones entrelazados. La percepción es otro más de los fenómenos que no podrá entenderse más que uniendo los esfuerzos de biólogos, químicos y físicos. Aunque es común creer que no hay nada más alejado de nuestros sentidos que la mecánica cuántica, nuestros sentidos parecen ser, en el fondo, cuánticos. Agradecimientos
Este trabajo se realizó con apoyo de DGAPA-UNAM mediante el proyecto IN111119.

Referencias
Daltónico, W. Luis Mochán, diario *La Unión de Morelos*, 3 de octubre de 2011, pags. 28,29. <http://bit.ly/pe3MC8>
Michael Bach, *Optical illusions & visual phenomena*, <https://bit.ly/3p9aIe9>
Usted es Desafinado (parte 1 de 2), W. Luis Mochán, diario *La Unión de Morelos*, 5 de septiembre de 2011, pag. 31. <https://bit.ly/3ISi940>
Usted es Desafinado (parte 2 de 2), W. Luis Mochán, diario *La Unión de Morelos*, 12 de septiembre de 2011, pags. 33 y 13 de septiembre de 2011, pags. 22 y 23. <https://bit.ly/3DQTzWw>
Dra Mara Alaide Guzmán Ruiz, *El sistema olfativo: ¿para qué sirve y cómo funciona?*, <https://bit.ly/2Z4R19n>
Turin, Luca. 1996. *A Spectroscopic Mechanism for Primary Olfactory Reception*. *Chemical Senses* 21 (6): 773-91. <https://bit.ly/3DXbko7>
W. Luis Mochán, *Magia resonante*, diario *La Unión de Morelos*, 13 de noviembre de 2017, pgs. 30 y 31. <http://bit.ly/2jQSRwa>
Entrelazados, W. Luis Mochán, diario *La Unión de Morelos*, 2021-06-07 p. 16-17. <https://bit.ly/3DSNpPr>
Johnjoe McFadden and Jim Al-Khalili, *A quantum sense of smell*, *Physics Today* (podcast), marzo, 2015. <https://bit.ly/3lMnqKu>
María Isabel Franco, Luca Turin, Andreas Merishin, and Efthimios M. C. Skoulakis, *Molecular vibration-sensing component in Drosophila melanogaster olfaction*, PNAS, <https://bit.ly/3BXIRPC>
Eric Block et. al, *Implausibility of the vibrational theory of olfaction*, PNAS 2015 112 E2766-E2774, <https://bit.ly/3aIa8s6>.

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos. Desde la Academia de Ciencias de Morelos externamos nuestra preocupación por el vacío que genera la extinción de la Secretaría de Innovación, Ciencia y Tecnología dentro del ecosistema de innovación estatal que se debilita sin la participación del Gobierno del Estado.

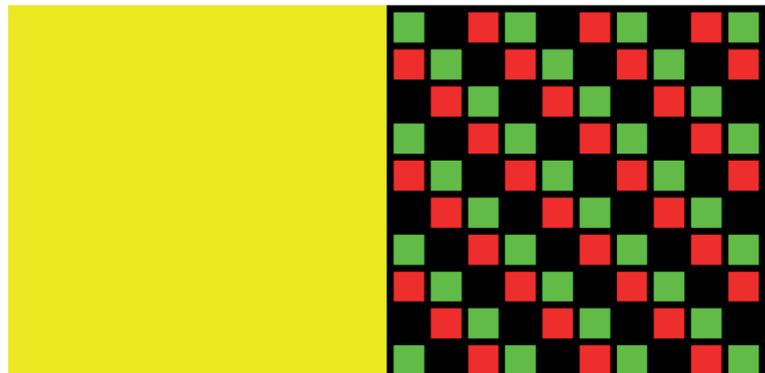


FIGURA 1: EL color amarillo (izquierda) se confunde en el ojo con el color producido por una mezcla de elementos rojos y verdes (derecha) cuando éstos son muy pequeños y están muy juntos.

ESTA PUBLICACIÓN FUE REVISADA POR EL COMITÉ EDITORIAL DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS

Para actividades recientes de la academia y artículos anteriores puede consultar: www.acmor.org.mx
¿Comentarios y sugerencias?, ¿Preguntas sobre temas científicos? CONTACTANOS: editorial@acmor.org.mx