

El halo solar



1. Foto tomada por Javier Armas del halo solar visible en la Cd. de México en mayo 21 de 2015. Se nota su forma circular perfecta y los tonos rojizo y azuloso de su borde interior y exterior, respectivamente. Disponible en <http://bit.ly/1HWdG7m>.

W. Luis Mochán

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM
Academia de Ciencias de Morelos

Introducción

iFue espectacular! Muchos lo vieron en el cielo. Los que no, probablemente pudieron verlo en múltiples fotos que circularon en la prensa y en las redes sociales. Me refiero al halo solar que adornó el cielo de la ciudad de México el 21 de mayo pasado (ver figura 1). El fenómeno se repitió apenas una semana después, el 28 de mayo. En Morelos también se ha dejado ver, por ejemplo, el 16 de agosto de 2014 (ver figura 2). El halo no sólo se forma en torno al Sol; por ejemplo, el 29 de mayo a las diez de la noche pudo verse desde Cuernavaca un fenómeno similar alrededor de la luna. ¿Qué es? ¿A qué se debe? ¿Cómo se forma? Intentar contestar estas preguntas nos puede llevar a profundizar en áreas diversas de la ciencia. Empecemos por describir cómo se ve. Las figuras 1 y 2 muestran que el halo consiste en un aro circular luminoso centrado en el Sol, con una ligera coloración que cambia entre sus bordes interior y exterior. En la figura 2 se nota además que la región rodeada por el aro es más oscura que la región externa, produciendo la ilusión de un túnel en el aire. Si al observar el halo solar Ud. estirara el brazo derecho extendiendo los dedos de su mano, cerrara el ojo izquierdo y moviera el brazo hasta tapar el Sol con el dedo pulgar, notaría que el dedo meñique alcanzaría a tapar parte del halo. Esto no significa que el halo mida lo mismo que su mano extendida, así como tapar el Sol con su pulgar no significa que el Sol mida lo mismo que su dedo. Lo que sí significa es que sus *aperturas angulares* son iguales: el ángulo entre una línea que vaya del ojo del observador a su dedo pulgar y otra que vaya de su ojo al dedo meñique es aproximadamente igual al

ángulo entre una línea que vaya del ojo al Sol y otra línea que vaya del ojo a cualquier punto del halo; este último ángulo es muy cercano a 22° .

Seguramente el lector ha escuchado que el halo es un fenómeno óptico que se produce en la alta atmósfera en ciertas condiciones ambientales de temperatura y humedad, en las cuales se forman cristales de hielo que refractan la luz solar. Lo que deseo explicar en este artículo es cuál es la forma de dichos cristales, por qué toman esa forma, por qué refractan la luz como lo hacen y por qué eso da lugar a un halo como el que pudimos ver.

Molécula del agua

Para entender cómo se forma el halo, empecemos con un poco de *física atómica*. Los átomos están formados por pequeñas partículas: protones y neutrones que forman sus núcleos y electrones que giran a su alrededor. Todos los protones tienen una carga positiva llamada e , y cada electrón tiene una carga igual de grande pero negativa, $-e$, de manera que un átomo es neutro cuando tiene exactamente el mismo número de electrones que de protones. El núcleo de un átomo de hidrógeno H tiene apenas un protón, por lo cual el *átomo* de H tiene un electrón. Similarmente, un átomo de oxígeno tiene ocho protones y por tanto, ocho electrones. Pero todo esto, ¿qué tiene que ver con los halos?

Le pido al lector un poco de paciencia y que me permita contarle que de acuerdo a la *mecánica cuántica* los electrones se comportan como ondas. Así como una cuerda de guitarra al aire (sin ser presionada) puede producir sólo algunos sonidos, la nota fundamental y su serie de armónicos (seguramente Ud. tiene algún amigo guitarrista que se los pueda enseñar), los electrones en los átomos sólo pueden tener algunos *estados*. Un principio fundamental, el *principio de Pauli*, nos dice que no puede haber más que dos electrones en cada estado ([ver nota 1]). Por lo tanto,

si pudiéramos *fabricar* átomos añadiendo sus electrones de uno en uno, colocaríamos a los primeros en los estados de menor energía disponibles y, al ocuparse éstos, buscaríamos entre los restantes, aquellos con la menor energía.

El oxígeno tiene un estado donde podemos colocar los primeros dos electrones, y cuatro estados con un poco más de energía, llamados *orbitales de valencia*, en que los electrones, manteniéndose lo más alejados posibles unos de otros, se colocan a lo largo de las direcciones que apuntan hacia los vértices de un tetraedro (ver figura 3). En estos cuatro orbitales podríamos colocar hasta ocho electrones, pero habiendo ya colocado dos, sólo nos quedarían seis. Dado que todos los electrones tienen la misma carga, y que cargas iguales se repelen, la manera natural de colocarlos sería empezando con uno en cada orbital. Así, después de colocar los primeros cuatro, nos faltaría aún colocar dos electrones que tendríamos que poner en cualquiera de los orbitales previamente empleados. Finalmente, terminaríamos con dos electrones en cada uno de dos orbitales de valencia y con un sólo electrón en cada uno de los otros dos orbitales.

Al acercarse dos átomos de hidrógeno a un átomo de oxígeno, el electrón de cada uno de ellos puede colocarse cómodamente en los orbitales incompletos del oxígeno, formando así una molécula de agua, H_2O . Lo importante es notar que de un lado de la molécula de agua hay dos parejas de electrones, mientras que del otro lado hay otras dos parejas de electrones y dos protones. Luego, un lado de la molécula tiene un exceso de carga negativa, mientras que el otro tiene un exceso de carga positiva, mientras que la molécula es globalmente neutra. El ángulo formado por los orbitales es el formado por los vértices de un tetraedro vistos desde su centro, 109.47° . De hecho, la repulsión entre los electrones produce un efecto un poco menor del lado de los protones, por

lo cual el ángulo entre los átomos de H es un poco menor, 104.45°

Estructura del agua

¿Y eso qué? podría preguntarse el desesperado lector. Resulta que, como cargas opuestas se atraen, los H de una molécula de H_2O son atraídos por las parejas de electrones de otra molécula de H_2O , formando *puentes de hidrógeno*, los cuales son responsables de las complejísticas propiedades del agua. En particular, el ángulo entre dos puentes de hidrógeno en la estructura de agua es cercano al que dicta la geometría del tetraedro. En el agua líquida a temperatura ambiente los puentes de hidrógeno se forman y se rompen continuamente debido a las *vibraciones térmicas* de las moléculas. Sin embargo, a bajas temperaturas las moléculas se mueven lentamente y no tienen suficiente energía para romper los enlaces de hidrógeno una vez formados, por lo cual el agua forma una estructura rígida, un sólido, un cristal de hielo. En la figura 4a se muestran muchas moléculas de agua, cada una enlazada con otras mediante puentes de hidrógeno. En la figura sólo muestro dos o tres puentes de los cuatro puentes de cada molécula, unos involucrando uno de sus hidrógenos y otro involucrando los ajenos. Los puentes están indicados por líneas rectas. La figura muestra tres grupos horizontales de seis moléculas cada uno que parecen formar el contorno de pequeñas sillas de playa unidas entre sí, pero que vistos desde otro punto de vista (figura 4b) son hexágonos perfectos, apilados unos encima de otros. El ángulo entre las aristas de un hexágono es de 120° , un poco mayor que el ángulo de 109.47° de los enlaces tetragonales y que los 104.45° de los enlaces $O-H$, por lo que es fácilmente alcanzable subiendo un poco tres moléculas y bajando las otras tres respecto al plano nominal del hexágono (ver con detenimiento la figura 4a).

Espero que el lector se haya convencido de que el hielo está formado por una co-



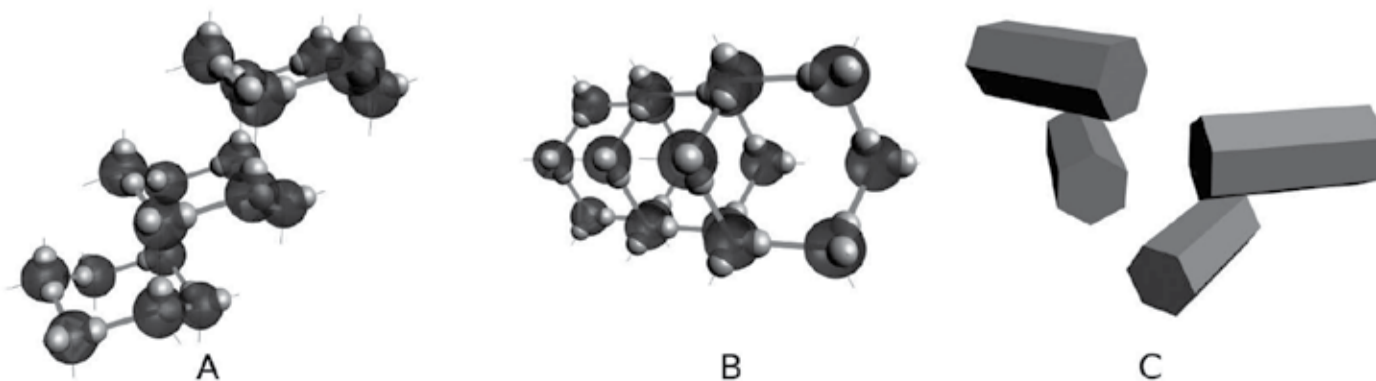
2. Foto tomada por el usuario SilverBG10 de Wikimedia del halo solar visible en Cuernavaca el 16 de agosto de 2014. Se nota que el disco interior del halo es ligeramente más oscuro que el exterior. La foto muestra otros fenómenos ópticos atmosféricos que no se discuten en este artículo. Disponible en <http://bit.ly/1cqA3Uj>.



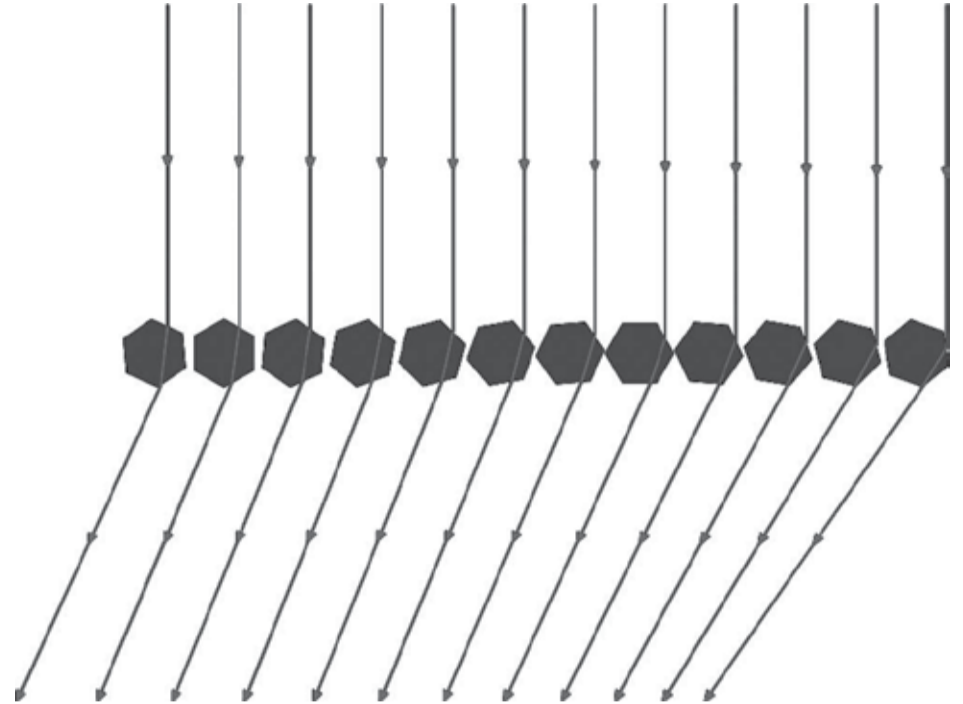
3. Representación esquemática de una molécula de agua. Los 6 electrones de valencia de un átomo de oxígeno se distribuyen a lo largo de las cuatro direcciones tetraedrales formando dos parejas y dos electrones que pueden compartirse con los de dos átomos de hidrógeno. Se ilustra el átomo de oxígeno (esfera azul), un tetraedro inscrito (verde) para ilustrar las direcciones tetraedrales de los orbitales (líneas azules) y los dos átomos de hidrógeno (esferas doradas).

lección de anillos hexagonales apilados. Así como la sal de mesa (NaCl) está formada de granos cúbicos, pues microscópicamente está formada de cubitos apilados, con un átomo de Na en cada vértice y un átomo de Cl en cada cara, el hielo puede crecer en forma de cristales en forma de prismas hexagonales (ver figura 4c) heredando su forma de los anillos microscópicos que lo componen. De hecho, dependiendo de la humedad del aire y de la temperatura, el agua puede cristalizar como placas hexagonales, como copos de nieve en forma de estrellitas hexagonales con dendritas, como largas agujas o como prismas huecos, y si la temperatura se halla entre -3 y -10°C y la humedad es baja, del orden de 0.02 gramos en cada metro cúbico de aire, los cristales de hielo crecen lentamente y forman prismas hexagonales sólidos. No deben sorprender al lector

las variadas formas de los hielos que saca de su congelador, pues ellos no están formado por uno, sino por *muchísimos* cristales diminutos, pero cada uno de ellos sí tiene una estructura hexagonal. El agua nos ofrece un espectáculo. En un día afortunado, la luz que proviene de la ardiente superficie de ese horno nuclear que llamamos Sol y que viaja durante ocho minutos a una velocidad de casi trescientos mil kilómetros cada segundo a través del espacio vacío para llegar a la tierra, podría atravesar una región de la alta atmósfera donde hubiese algunos billones de billones de moléculas de agua pegadas mediante sus puentes de hidrógeno para formar un pequeño cristal en forma de, adivinó Ud., un prisma hexagonal. Cuando la luz penetra en uno de dichos cristales, se *refracta*, es decir, cambia su



4. Panel derecho (A): Fragmento de un cristal de hielo, formado por moléculas de agua unidas una a otras mediante puentes de hidrógeno. Algunos puentes de hidrógeno están enfatizados con líneas más gruesas pues son los que forman las estructuras anulares hexagonales. Panel central (B): Otra vista del mismo fragmento de cristal proyectado en la dirección normal a los hexágonos nominales. Panel derecho (C): Pequeños cristales de hielo flotando en el aire en forma de prismas hexagonales con varias orientaciones aleatorias.



5. Refracción de la luz de acuerdo a la ley de Snell por un cristal hexagonal de hielo para distintas orientaciones. Notamos distintos ángulos de dispersión, pero la mayoría se agrupa alrededor del ángulo mínimo cercano a los 22° . La luz que toca esas dos caras no se dispersa menos de 21.8° para ninguna orientación.

dirección de propagación, a la vez que cambia su velocidad. La expresión matemática que describe la refracción de la luz fue derivada por Willebrord Snellius en 1621 y por ello se conoce como la *ley de Snell*, aunque había sido descubierta y redescubierta varias veces antes, empezando con Ibn Sahl de Bagdad quien la incorporó en su libro *Sobre Espejos y Lentes que Queman* escrito en el año 984. En su forma moderna, esta ley expresa un hecho fundamental: la conservación del ímpetu de la luz a lo largo de las superficies refractantes.

En la figura 5 se muestran rayos de luz que llegan a varios prismas de hielo transparente cuyo índice de refracción [ver nota 2] es $n=1.31$, por lo que en ellos la luz viaja 24% más lentamente que en el aire. Al penetrar y al salir de cada prisma la luz sufre refracciones de acuerdo a la ley de Snell. La dirección en la que emerge la luz dispersada por cada cristal de hielo depende de la orientación del mismo, como apreciamos al comparar el lado derecho con el lado izquierdo de la figura. Sin embargo, existen muchas orientaciones para las cuales la dispersión es *prácticamente* la misma. Por lo tanto, si tuviéramos muchos cristales flotando sobre una corriente de aire y orientados al azar, un número con-

siderable de ellos desviaría la luz aproximadamente por dicho ángulo. El ángulo de dispersión *más probable* corresponde a la *desviación más pequeña* de todas. Ésta se puede calcular con la ley de Snell y empleando las herramientas del *cálculo diferencial*, y para nuestros prismas de hielo resulta ser 21.839° . Si quisiéramos observar la luz dispersada por estos cristales, lo que debemos hacer entonces es alejar la vista del Sol 22° hacia arriba, abajo, un lado o el otro, en cualquier dirección. Por esto es que el halo se *ve circular*. Como en el hielo la velocidad de la luz depende de su color, siendo más lenta para el azul que para el rojo, la luz azul se desvía más y el borde externo del halo se ve azulado, mientras que el borde interno se ve rojizo. Como no hay dispersión de luz por ángulos menores a 21.8° , el interior del halo es más oscuro mientras que el exterior es más brillante que el resto del cielo.

Cuando muchos rayos de luz coinciden en su dirección o posición forman unos patrones llamados *cáusticas*, como las líneas brillantes que suelen verse en el fondo de las albercas por la refracción en las pequeñas olas que se forman en la superficie, o las líneas brillantes que se aprecian en una taza de café iluminada por el Sol matutino. Existen muchos otros fenómenos ópticos relacionados con las cáusticas, como el *arcoiris* y la *gloria*. Otro fenómeno ondulatorio que tienen que ver con cáusticas son las olas monstruosas que repentinamente se forman en el mar causando enorme daño a algunas embarcaciones y a cuyos tripulantes suelen tachar de exagerados. En resumen, combinando un poco de mecánica cuántica, química, geometría, termodinámica, óptica y cálculo hemos podido explicar un fenómeno natural muy llamativo. Probablemente, ahora el lector esté ahora preparado para apreciar *aún más* su belleza cuando lo vuelva a presenciar.

Notas

De hecho, sólo podemos poner un electrón en cada estado, pero éstos se suelen dar por parejas que difieren únicamente por el sentido en el que rota cada electrón respecto a su eje.