

Los colores del Cielo

Gerardo Odrizola

Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Azcapotzalco
godrizo@azc.uam.mx

Catalina Haro-Pérez

Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Azcapotzalco
cehp@azc.uam.mx

Carlos-Alejandro Vargas

cvargas@azc.uam.mx
Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Azcapotzalco

Resumen

El artículo describe la paradoja de Olbers, vinculándola con el color negro del cielo nocturno; el efecto Purkinje, por el que vemos las estrellas blancas, y las teorías de Rayleigh y Mie que explican el azul del cielo, los tonos amarillo-anaranjados del Sol, lo rojizo de los atardeceres y lo blanco de las nubes.

Palabras clave

Paradoja de Olbers, efecto Purkinje, teoría de Mie, teoría de Rayleigh y colores del cielo.

Abstract

This manuscript describes the Olbers paradox, the Purkinje effect, and the Rayleigh and Mie theories of light scattering, explaining their link with the black of the night, the white of the stars, the blue of a clear day sky, the yellowish colors of the Sun, the reddish of sunsets, and the milky appearance of clouds.

Keywords

Olbers paradox, Purkinje effect, Rayleigh and Mie theories and colors of the sky.

Cita APA: Odrizola, G., Haro, C. y Vargas, C. (2024). Los colores del Cielo. *Azcatl*, 2, 20-31.

DOI: [10.24275/AZCATL2024A004](https://doi.org/10.24275/AZCATL2024A004)

Introducción. Del cielo y las banderas

Muchas banderas tienen un significado, otras no tanto. La de México es particularmente una de las más ricas en este sentido. Se dice que el blanco refleja la pureza y unión del pueblo; el rojo representa la sangre vertida por los héroes patrios, y el verde es la esperanza, la idea de lograr la independencia de España (Bandera de México, s.f.). Ni hablar del águila que devora la serpiente mientras se posa sobre el nopal, rodeada de ramas de encino y laurel, inspirada en la leyenda de la fundación de México-Tenochtitlan. La de España, la rojigualda, tiene unos colores de origen más pragmático: el rojo era un tinte fácil de lograr y el amarillo se distingue muy bien en el mar (Bandera de España, s.f.). Su escudo representa a los antiguos reinos de Castilla, León, Aragón, Navarra y Granada, y se encuentra entre las dos columnas de Hércules, bajo la corona real, que representa al escudo de armas de la casa de los Borbones. Las hay otras, y no son pocas, que representan el cielo o al menos tienen alguno de sus elementos típicos: estrellas, soles, lunas e incluso constelaciones no faltan por ahí. La de Uruguay es un ejemplo extremo de esta categoría, pues representa un cielo parcialmente nublado (Bandera de Uruguay, s.f.).

Dentro de las banderas que contienen elementos del cielo podemos mencionar la de Turquía, las de Australia y Nueva Zelanda, prácticamente copia una de la otra, similar a lo que ocurre con las de Argentina y Uruguay, la de China, Estados Unidos, Antigua y Barbuda, Japón, Filipinas, Kirguistán, Kazajistán, Turkmenistán, Singapur, Mauritania y Pakistán, ¡entre muchas otras! (Pérez, 2017). Como se mencionó, algunas banderas tienen lunas, otras poseen soles y unas más detentan estrellas. Otro caso extremo es la bandera de Brasil, que no conforme con representar algunos elementos del cielo, se fue un paso más allá y, literalmente, pintó un universo. En ella aparecen las constelaciones de la Cruz del Sur, Escorpión, la Hydra, el Triángulo Austral y el Can Mayor, entre otras. Además, ya que Brasil abarca tanto el norte como el sur debido a su vasta extensión geográfica, su bandera también incluye a Virginitis (Virgo) al norte de su lema *ordem e progresso*, de hecho, cada objeto estelar se asocia con un estado de Brasil.

Lo cierto es que el cielo, o al menos algunos de sus componentes, se representa en un gran número de banderas (la del estado de Yucatán es otro ejemplo cercano) y esto no es tan extraño. Son muchas las culturas y las personas que le atribuyen connotaciones espirituales o religiosas, conectando el cielo con lo divino. Otros ven en él un símbolo de amplitud y libertad, como mínimo, siempre apreciado por su inmensa belleza. Durante el día lo vemos en un espectacular tono celeste (si no estamos en la Ciudad de México), salpicado aquí y allá de blanco, ya sean cirros o nimbos. Por la noche lo vemos en blanco y negro, pero realmente está lleno de colores. Durante los amaneceres y atardeceres se tiñe de tonos naranjas y amarillos, o rojos y anaranjados. Sin embargo, como está siempre presente, a veces no le prestamos la atención que merece.

¡Hagámoslo ahora!

Lo negro del cielo

«La oscuridad no me preocupa. Me preocupa la luz. La oscuridad es solamente ausencia de luz. Pero la ausencia sí me preocupa. La preocupación no. Me es indiferente...»

Maslíah, 2002

Nos parece obvio, pero no lo es. La oscuridad, el color negro, es la ausencia de luz. Si no llega información a nuestros ojos entonces vemos su ausencia, vemos lo que nuestro cerebro interpreta como negro. Por otro lado, la luz es radiación electromagnética y ésta es generada por las estrellas, junto con otras cosas, que en este artículo, por el momento, no nos ocuparemos. Si miramos en alguna dirección hacia el cielo nocturno y vemos negro, eso significa que no hay estrellas en esa dirección. Y que no haya estrellas nos indica que si el universo en su conjunto es más o menos homogéneo, no puede ser infinito. Esta idea la propuso Olbers en 1823, quien planteó la paradoja que hoy lleva su nombre. Sin embargo, previamente, Kepler ya la había notado en 1610 (Harrison, 1987). Olbers argumentó lo siguiente: para un universo infinito provisto de estrellas, uniformemente distribuidas, cualquier punto

del cielo debería verse brillante, puesto que siempre encontraríamos una estrella independientemente de la dirección de observación (Olbers, 1826). Es decir, para una densidad uniforme de estrellas, el número de éstas situadas en la superficie de una esfera que se encuentra a una determinada distancia del centro de la Tierra crece con esta distancia al cuadrado. Entonces, cuanto más lejos vemos (capas de cielo más lejanas), más estrellas habrá allí.

Se sabe, y se sabía en otra época, que la intensidad de la luz que nos llega desde las estrellas decrece con la distancia al cuadrado. Esto es una consecuencia directa del principio de conservación de la energía. La energía que parte de una estrella (o de un emisor cualquiera) por unidad de tiempo y que cruza cierta área a cierta distancia del emisor tendrá que ser la misma que cruza a una distancia mayor, si no hay nada que obstaculice el flujo de dicha energía. Así, la energía (y la intensidad) disminuye con la distancia de forma cuadrática para compensar la mayor área que atraviesa a medida que aumenta la distancia, de modo que la cantidad total es invariante y justo esto compensa el hecho de que haya más estrellas. En resumen, si mirásemos a cualquier punto arbitrario del cielo nocturno deberíamos encontrarnos siempre con una estrella y ver su luz. Pero Olbers no se detuvo allí sino que calculó cuánta energía en forma de luz nos llegaría desde el cielo nocturno y concluyó que sería equivalente a 50 000 veces la que recibimos del Sol. Esto, a su vez, elevaría la temperatura de la Tierra a algo más de 5 000 °C.

La paradoja se resuelve considerando la existencia de un universo finito, como lo postula la teoría del Big Bang (National Aeronautics and Space Administration [NASA], 2012), junto con el hecho de que la luz viaja a una velocidad finita e independiente del movimiento del observador y su fuente. Este último supuesto junto con la invarianza de las leyes de la física para sistemas de referencia inerciales dieron lugar a la teoría de la relatividad especial (Einstein, 1905). Un universo finito limita el número de capas de estrellas que podemos observar, incluso para un universo homogéneo. Además, con el tiempo hemos aprendido que el universo está lejos de ser homogéneo, ya que presenta estructuras que abarcan diferentes esca-

las espaciotemporales, desde nuestro sistema solar (abarcando segundos a horas luz), galaxias (desde años a miles de años luz), cúmulos (millones de años luz) y supercúmulos (miles de millones de años luz).

Por otro lado, la velocidad finita de la luz nos permite ver el pasado. Funciona de la siguiente manera: cuanto más lejos vemos, más temprano ocurrió el evento que observamos. La información que nos llega del Sol tiene un retraso de aproximadamente ocho minutos y algunos segundos, simplemente porque la luz tarda ese tiempo en recorrer la distancia que nos separa. La luz que proviene de Próxima Centauri, la estrella más cercana a la Tierra, demora un poco más, alrededor de cuatro años y fracción. La distancia que nos separa es proporcional al tiempo que la luz tarda en recorrerla. Por lo tanto, el año luz se convierte en una unidad de distancia (y no de tiempo) que se utiliza frecuentemente en astronomía. La información que nos llega de Andrómeda, la galaxia más cercana a la nuestra, la Vía Láctea, tiene unos 2.5 millones de años, por lo que no es ninguna novedad lo que sabemos de Andrómeda. Esto funciona en ambas direcciones, ya que los habitantes de Andrómeda ven lo que ocurrió aquí hace 2.5 millones de años, cuando en la Tierra se vivía en el período paleolítico y aún no aparecía el *Homo habilis* (Toth, 2007). Siguiendo con el razonamiento, si observamos objetos cada vez más lejanos, la información que obtenemos es cada vez más antigua. Estamos viendo el pasado y no el presente. Llega un punto en el que ya no podemos ver más, simplemente porque estamos intentando observar más allá del tiempo cero, más allá del equivalente en distancia a los 13.6 mil millones de años de existencia del universo. Si nuestro universo fuera estático, 13.6 mil millones de años luz sería precisamente la distancia que definiría el radio del universo observable. Sin embargo, no es así, éste es mucho más extenso.

Potencialmente podríamos ver objetos situados a una distancia de hasta 46.5 mil millones de años luz (si los telescopios lo permitieran), lo que equivale a unos 880×10^{24} metros (Gott, 2005). Esto se debe a la expansión del universo. Al superar esta barrera, la luz no ha tenido tiempo suficiente para alcanzarnos. Podríamos decir que está

en camino, pero aún no ha llegado y nunca lo hará, simplemente porque la distancia que se crea por unidad de tiempo es mayor que el avance de la luz. La expansión universal acelerada hace que los objetos observables más allá del super agregado local (agregado de pequeñas galaxias) desaparezcan, ya que la luz llega cada vez más tenue (recordemos que su intensidad disminuye con el cuadrado de la distancia a la fuente) y más desplazada hacia el rojo, debido al efecto Doppler (Serway y Faughn, 2005). Sin embargo, a simple vista, el cielo seguirá pareciendo más o menos igual, ya que todo lo que vemos pertenece a nuestra galaxia o a galaxias cercanas. De hecho, posiblemente parecerá aún más poblado de estrellas porque se espera que Andrómeda colisione con la Vía Láctea en unos 4.5 mil millones de años (Cowen, 2012), que es más o menos la edad de la Tierra.

A pesar de que existen más elementos más allá del límite de nuestro universo observable¹, estos objetos se alejan debido al proceso conocido como expansión universal. El hecho de que las estructuras del universo se alejen entre sí, y lo hacen más cuanto más grande es la distancia que las separa, es algo medible y conocido (Overbye, 2017). Ahora, la explicación humana de por qué pasa lo que vemos que pasa hace referencia a un tipo de energía llamada, por los que dicen saber, oscura² (Peebles, 2003). Pero bueno, volviendo a lo que sí se sabe, cuanto más lejanos están dos puntos del universo, más rápido se separan, tanto que los puntos separados a 46.5 mil millones de años luz se alejan a una velocidad mayor a la velocidad de la luz³, por lo que pasado un rato dejamos de verlos. Incluso se han observado galaxias que se alejan de nosotros a velocidades superiores a la de la luz (esto se

determina a través del corrimiento al rojo de su espectro electromagnético), lo que significa que los puntos separados por distancias menores a 46.5 mil millones de años luz también siguen esa tendencia (otro efecto peculiar de la expansión acelerada). A medida que transcurre el tiempo podemos observar objetos más distantes, pero estos objetos se alejan más rápido de lo que la frontera de nuestro universo observable se expande, lo que limita nuestro acceso a la información. Cuanto más tiempo pasa, menos información accesible, una cosa terrible.

Lo blanco de las estrellas

Las estrellas parecen blancas, pero en realidad tienen colores distintos dependiendo de su temperatura; algunas son más azules y otras más rojas, similar a las diferentes regiones de la llama de un mechero (Forde, 2022). Entonces ¿por qué las percibimos como blancas? La respuesta se encuentra en la manera en que funcionan nuestros ojos, no en la naturaleza de las estrellas, y se conoce como el efecto Purkinje (Frisby, 1980). Después de que la luz atraviesa la córnea, el cristalino y el humor vítreo para enfocarse en la retina, esta información es recopilada por células conocidas como conos y bastones (su nombre proviene de su forma) (Santini, 2015). Luego, esta información se transmite al cerebro a través del nervio óptico para su procesamiento⁴. Los bastones son altamente sensibles y eficientes, lo que los hace ideales para la visión nocturna, aunque proporcionan baja resolución. Por otro lado, los conos ofrecen una alta resolución y reaccionan de manera diferenciada según la longitud de onda de los distintos fotones que llegan a nosotros, pero son menos sensibles. A lo largo del tiempo, los conos se han espe-

1 Es preciso notar que el universo observable terrestre no es el mismo que el universo observable de Andrómeda, es otro, y ambos quedan dentro del universo que compartimos.

2 Lo escribimos así simplemente porque no hay consenso. Los que dicen saber tienen muy claro que no lo saben, por eso le llaman energía oscura.

3 Alguien podrá objetar que no es posible que se alejen a mayor velocidad de la cosa que más rápido se mueve en el universo, la luz, pero así ocurre. Esto es porque en realidad no se están moviendo sobre el tejido del universo sino que es el mismo tejido el que se mueve. La luz es lo que más rápido se mueve sobre el tejido del universo.

4 Parte se procesa ahí mismo por la red de conos y bastones. El ojo es como la especialización de un trozo de cerebro, hay neuronas en la retina. Por ello, no es tan disparatado decir que cuando vemos a alguien a los ojos podemos ver sus pensamientos.

cializado en percibir diferentes colores y así detectar posibles amenazas durante el día. Hay tres tipos de conos: sensibles al azul, al rojo⁵ y al verde, y su número es mucho menor que el de bastones. La selección natural ha llevado a que veamos más tonalidades de amarillo y verde (en el centro del espectro visible) en comparación con el azul o el rojo (Vision Boutique, 2021). Nuestros ancestros, que provienen de la sabana, debían ser capaces de distinguir entre un amarillo verdoso y un amarillo leopardo. Según la teoría de Darwin, esta habilidad les confería una ventaja de supervivencia sobre sus semejantes, lo que finalmente derivó en nuestra existencia actual, donde disfrutamos de una amplia gama de tonos verdes-amarillos, similares a los que se encuentran en las pelotas de tenis (percibidas como verdes por algunos y amarillas por otros).

Ver de noche también era (y sigue siendo) importante, por lo que otro tipo de células se especializó en esta tarea: los bastones. Sin embargo, su función va más allá de la visión nocturna, ya que también son responsables de detectar movimiento y sombras, tanto de noche como de día. Asimismo, son los encargados de captar la escasa radiación que nos llega desde las estrellas. Dado que esta radiación es tan tenue, los conos contribuyen poco en esta situación, lo que resulta en una percepción en blanco y negro de la noche, incluyendo los colores del cielo nocturno. Incluso una rosa roja se percibe como gris en condiciones de muy poca luz ambiental (ver Figura 1) (Frisby, 1980).

El azul del cielo

La atmósfera es la responsable de tan intenso color. Sin ella no habría azul del cielo, sólo negro, ausencia. ¿Pero cómo funciona? Bueno, tiene que ver con una de las cosas que puede hacer la luz cuando se encuentra con algo (ver Figura 2), se puede dispersar. Para comprender el fenómeno debemos tener primero una idea de qué es la luz: radiación electromagnética (Halliday, 2007). Se le



Figura 1. Imagen de una rosa iluminada (izquierda) y sin iluminar (derecha), generada con la inteligencia artificial Leonardo.ai. El color rojo de la rosa se pierde en la imagen de la derecha, de acuerdo con el efecto Purkinje.

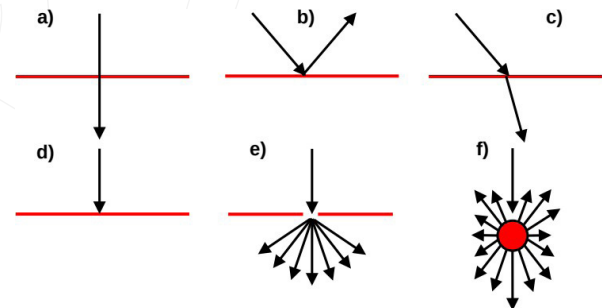


Figura 2. Diferentes fenómenos que presenta la luz cuando se encuentra con objetos o cambia de medio (del aire al agua, por ejemplo): a) Transmisión. El objeto se dice transparente a ese tipo de radiación cuando la luz no interacciona con él. b) Reflexión. La luz se refleja y podemos ver imágenes sobre la superficie, tal como en un espejo. c) Refracción. La luz cambia de dirección al cambiar de medio. d) Absorción. La luz es absorbida por el material. e) Difracción. Ocurre cuando la luz pasa a través de una rendija de ancho similar a su longitud de onda. f) Dispersión. La luz se dispersa en todas las direcciones al encontrarse con una partícula.

llama así porque está hecha de campos eléctricos y magnéticos que se desplazan en dirección perpendicular a sus propias direcciones (son vectores), siendo éstos también perpendiculares entre sí (ver Figura 3). Además, el campo eléctrico fluctuante produce campo magnético fluctuante que vuelve a generar campo eléctrico fluctuante un

5 Estos son los que no tienen Luna y Gokú (un par de perritos). Ellos no ven rojos, pero sí azules y amarillos (Wolchover, 2022). No ven en tonos de grises como se dice por ahí

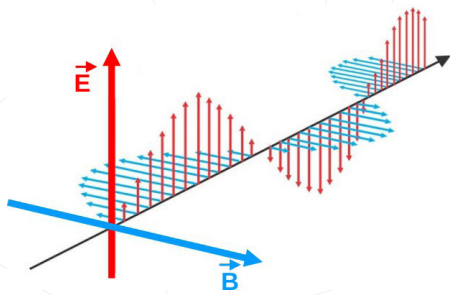


Figura 3. Esquema de los campos eléctrico y magnético que se producen de forma simultánea al propagarse la luz. En el esquema, los campos se representan estáticos (como si se tratara de una foto), pero éstos cambian con el tiempo. Nótese que los campos son siempre perpendiculares a la dirección de propagación de la luz (flecha negra). En este ejemplo particular, los campos oscilan en una única dirección, lo que se conoce como luz linealmente polarizada. Estos campos oscilatorios son la radiación electromagnética, son la luz.

poco más allá del original, haciendo que la cosa avance a una velocidad ridículamente grande⁶ y sin disipar energía alguna en el proceso. Por eso, este campo que se genera en alguna estrella muy pero muy lejana eventualmente puede desplazarse e impactar nuestras retinas (se desplaza en el vacío y también en otros medios). A un paquete de estas ondas electromagnéticas se le llama fotón y su energía depende de su longitud de onda, cuanto más pequeña, mayor energía. Cuando la longitud de onda se encuentra entre los 400 y 700 nanómetros, aproximadamente, a la radiación electromagnética se le llama luz visible. Si es mayor tendremos infrarrojo (literalmente por debajo del rojo y se refiere a la frecuencia —proporcional al inverso de la longitud de onda— y no a la longitud de onda) y si es menor tendremos ultravioleta (por encima del violeta, otra vez haciendo referencia a la frecuencia y no a la longitud de onda). Así, nuestro ojo ve la radiación electromagnética comprendida en este intervalo de longitudes de onda, ni más ni menos. Otros animales ven otras regiones del espectro, como por ejemplo las abejas,

que pueden distinguir unas flores blancas de otras porque, efectivamente, no presentan el mismo espectro ultravioleta (Bowdler, 2010).

Entonces llega la luz del Sol a nuestra atmósfera y se encuentra con moléculas de oxígeno, nitrógeno y más cosas. Cuando se produce la interacción entre la luz y las moléculas, éstas se estresan por la presencia de este campo eléctrico que no estaba ahí hace un rato. Como los núcleos de dichas moléculas son pesados comparados con los electrones que los rodean, se puede considerar que el campo electromagnético incidente sólo perturba al movimiento de estos últimos, los cuales empiezan a oscilar con la misma frecuencia que el campo incidente. Este movimiento oscilatorio genera un dipolo que emite nuevas ondas electromagnéticas justo con su frecuencia, siguiendo el mismo mecanismo que una antena de radio. Es fundamental destacar que la radiación producida ya no sigue la dirección original de la radiación incidente, sino que se propaga en todas direcciones. Este tipo de interacción entre luz y materia se denomina dispersión (esparcimiento) elástica, porque los fotones dispersados poseen la misma energía (frecuencia) que los incidentes (ver Figura 2f). Si imaginamos a un observador madrugador mirando en la dirección opuesta al Sol, que asciende por el este, las moléculas de nitrógeno ubicadas al oeste y cerca del horizonte dispersarán radiación procedente de los rayos solares que finalmente llegará a su retina. Luego, este observador percibirá la luz dispersada por moléculas ubicadas al otro lado del cielo. En su mayoría, esta luz se presenta en tonalidades de azul, como el lector ya habrá deducido.

Rayleigh fue quien explicó todo lo anterior y también lo que sigue, y lo hizo inspirado en las observaciones de Tyndall (Young, 1981). Este último observó que las dispersiones coloidales de partículas nanoscópicas tienen un color azulado y sugirió que el color del cielo podría deberse al mismo efecto. Tenía razón.

Rayleigh dedujo una expresión matemática para la intensidad de la luz dispersada cuando la partícula que la produce es pequeña comparada con la longitud de onda

6 Esta cifra, 299 792 458 km/s (no es un número de celular, o quizás también, habría que probar) es absurdamente grande en términos humanos, pero ridículamente pequeña en términos del tamaño del universo. Es tan pequeña que hace muy difícil (si no imposible) la comunicación y encuentro entre las diferentes civilizaciones que podrían poblarlo.

de la radiación incidente (esto porque supuso que toda la partícula presencia el mismo campo eléctrico al mismo tiempo⁷) y además con un índice de refracción cercano a la unidad. La expresión es la siguiente:

$$I=I_0 \frac{(1+\cos^2(\theta))}{8RZ} \left(\frac{n^2-1}{n^2+2} \right)^2 d^6 \left(\frac{\pi}{\lambda} \right)^4,$$

donde I_0 es la intensidad de la radiación incidente, R es la distancia entre la partícula y el observador, θ es el ángulo que forman la dirección de propagación de la luz incidente y la dirección definida por la partícula y el observador, n es el índice de refracción de la partícula, d es su diámetro y λ es la longitud de onda de la radiación incidente (que, como vimos, es la misma que la radiación producida por el dispersor). Quizás lo más relevante de esta expresión, por lo menos para explicar el color del cielo, es que la longitud de onda aparece en el denominador elevada a la cuarta potencia. Esto hace que la radiación visible de 400 nm se disperse casi 10 veces más que la de 700 nm⁸. Esto favorece a los violetas y azules en comparación con los rojos y amarillos, lo que se combina con el hecho de que el oxígeno absorbe radiación ultravioleta y violeta visible, dejando principalmente a los azules como el color predominante del cielo (nos llega radiación de todo el espectro, pero mucha mayor proporción de azul, ver Figura 4).

Otra curiosidad que también resulta de este fenómeno es la polarización parcial de la luz que nos llega del cielo, lo que significa que la luz tiene una dirección preferente para la oscilación de su campo eléctrico (tal como se muestra en la Figura 3) (Young, 1981). Esta polarización se origina porque la fuente de luz, en este caso el Sol, genera un campo eléctrico que oscila únicamente en una dirección perpendicular a la propagación de sus rayos (no sólo el Sol, sino la luz en general se comporta de esta manera, ver Figura 3). En consecuencia, los dipolos moleculares presentes en la atmósfera pueden oscilar exclusivamente en el plano perpendicular a la dirección de la luz incidente. La proyección de un círculo ubicado en este

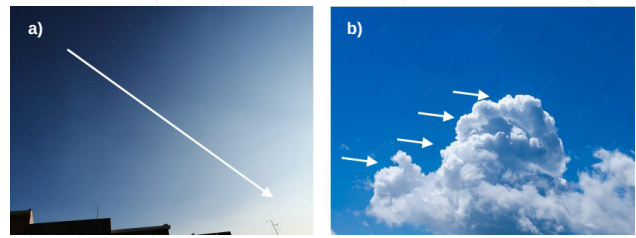


Figura 4. a) Foto de una sección del cielo. Cuanto más cerca de la fuente (el Sol) mayor es la saturación del color (más fotones de todas las longitudes de onda, más blanco). Al alejarnos, el cielo se percibe más azul. b) Foto de una nube. La fuente (el Sol) se encuentra a la izquierda, lo que produce blancos más intensos del lado izquierdo de la nube.

plano de oscilación y centrado en la partícula dispersora sobre el plano perpendicular a la dirección de observación, generalmente, produce una elipse. Esto explica por qué la luz del cielo se encuentra parcialmente polarizada, lo que significa que una dirección de oscilación tiene una mayor magnitud del campo que la otra.

Este efecto alcanza su máxima expresión cuando el Sol está justo sobre el horizonte. Es importante destacar que el patrón de polarización varía a lo largo del día y depende de la dirección desde la cual se observa, lo que lo convierte en un mecanismo utilizado por varios insectos para orientarse (Dacke *et al.*, 2003).

Finalmente, el fenómeno de la dispersión de la luz se comprende más fácilmente con la luz que produce un láser. El tipo de luz que provee este dispositivo es coherente (los fotones tienen la misma frecuencia y forma) y avanza en una única dirección (rayos colimados que son paralelos entre sí), lo que contrasta con otras fuentes de luz más convencionales. Hoy por hoy son baratos y se usan, entre otras cosas mucho más útiles, para señalar un punto en la proyección de alguien que está exponiendo algo. No importa cuán lejos se encuentre de la pantalla, el marcador láser siempre produce una mancha de luz más o menos

7 Esto lo hizo por el mismo motivo que suponemos que una cuerda no se estira y no tiene masa o que la fuerza se aplica en un único punto del sólido o que el cuerpo es rígido, lo hizo porque simplifica muchísimo el tratamiento matemático.

8 Tan sólo hay que hacer $1/400^4 / 1/700^4$, que es lo mismo que $700^4/400^4 = 9.38$. Un poquito de matemáticas no le hace daño a nadie.

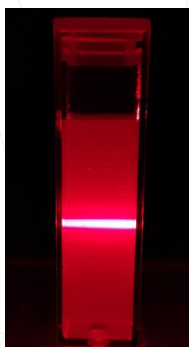


Figura 5. Haz de luz producido por un diodo láser de 660 nm de longitud de onda y potencia de 5mW (un apuntador láser común y corriente) que atraviesa de izquierda a derecha a una suspensión de partículas de poliestireno de 100 nm de diámetro. El haz no es visible ni antes ni después de atravesar la muestra, sólo se observa la luz producida por la dispersión Rayleigh debido a la presencia de las partículas coloidales.

del mismo tamaño (por aquello de la colimación). Habrán notado también que, en general, el haz de luz no se ve, no pasa lo que nos muestra *Star wars* con las espadas láser⁹. No vemos que el expositor golpee la pantalla con un bastón de luz, sólo vemos la marca sobre la pantalla y nada en su camino hacia ella. Pero sí se puede hacer algo para ver, indirectamente, el haz de luz, el bastón de luz que golpea a la pantalla¹⁰: podemos poner dispersores en su camino. Unos dispersores muy efectivos son las partículas de tamaño nanométrico (ver Figura 5). Si llenamos la sala de conferencias, donde se lleva a cabo la presentación, con algún tipo de humo, lograremos ver el haz láser (y de paso haremos que todos salgan).

Lo amarillo del Sol

Fuera de la atmósfera terrestre el cielo se ve negro sin importar si el Sol está o no visible para nosotros. El Sol, por otro lado, se ve blanco (no hay que mirarlo di-

rectamente y menos si estuviéramos fuera de la atmósfera terrestre). El Sol produce un continuo de radiación en el espectro electromagnético, que va desde el infrarrojo hasta el ultravioleta, luz que nuestro ojo vería como blanco (la suma de todos los colores). El Sol está clasificado como una enana amarilla, pero no es amarillo, lo que sin duda causa confusión (Forde, 2022). Las enanas amarillas son aquellas que pertenecen a la secuencia espectral G y tienen entre 0.7 y 1.2 masas solares. Aquéllas con masas cercanas a 0.7 sí son blanco-amarillas. Así que eso de que Superman toma energía del Sol amarillo no es correcto, si lo hace, lo hace de un Sol blanco (Univisión, 2014). Y entonces, ¿por qué lo vemos amarillo? Otra vez, Rayleigh tiene la respuesta. No lo vemos siempre igual; a veces lo vemos amarillo, a veces un poco más como blanco (al mediodía) y por las mañanas y las tardes más anaranjado e incluso medio rojo (otra vez, no lo miren, mucho menos al mediodía). Lo que vemos es el blanco de su espectro electromagnético original (antes de entrar a la atmósfera) menos todo lo que se dispersa por el camino (hay otros efectos además de la dispersión). Cuanto mayor sea la distancia recorrida por un rayo de sol a lo largo de la atmósfera, más azules y violetas pierde y más proporción de amarillos y rojos nos llegan. Al mediodía, sobre todo si estamos sobre el ecuador y en un equinoccio, los rayos solares recorren la mínima distancia posible sobre la atmósfera y caen perpendiculares sobre la superficie terrestre, por ello, la atmósfera no tiene mucha oportunidad de dispersar azules y el Sol se ve lo más blanco posible. Por el contrario, cuando el Sol se encuentra cerca del horizonte, la distancia que atraviesan sus rayos sobre la atmósfera es mucho mayor y se dispersan más los azules y violetas. Lo que vemos, la diferencia, es algo anaranjado e incluso medio rojo. Aquí importan otras cosas que también se encuentran dispersas en la atmósfera, como ciertas nano y micropartículas, algunas asociadas a la actividad humana y otras a causas

9 Posiblemente esto ocurra por la sensibilidad intrínseca de la luz al manejo de la Fuerza por parte de los Jedi y los Sith, pero no nos consta.

10 Aunque no se vea, el haz de luz sí que golpea a la pantalla, si hay transferencia de momento.

naturales como la actividad volcánica. En general, cuanto más rojo es el Sol del amanecer (o atardecer), mayor presencia de partículas dispersoras.

Lo naranja de los atardeceres

Cuando el Sol emerge en el horizonte por la mañana, en realidad aún no está allí. Del mismo modo, cuando está a punto de desaparecer por el horizonte occidental, tampoco está donde lo vemos. Esto no se debe únicamente a los 8 minutos y 20 segundos de retraso en la información que nos llega, sino a un fenómeno adicional. Imaginemos que congelamos las posiciones de la Tierra (incluida su rotación) y el Sol, y trazamos una línea recta desde un observador durante un atardecer hasta la posición aparente del Sol. Esta línea no llega a la superficie del Sol. La atmósfera de la Tierra presenta un gradiente de densidad que a su vez crea un gradiente en su índice de refracción, provocando que los rayos solares se desvíen lo suficiente como para que podamos ver el Sol cuando en realidad ya se ha ocultado o no ha salido. Sí, la atmósfera, además de permitirnos la vida, nos regala unos minutos diurnos extra. Este efecto es análogo a lo que ocurre cuando tratamos de observar un objeto a través de un vaso de vidrio con agua. Si colocamos un objeto del otro lado del vaso, pero no exactamente detrás de él, notamos que la imagen se ve desplazada respecto a su ubicación real. Cuando vemos un lápiz parcialmente sumergido en agua, éste parece quebrarse a la altura del menisco (ver Figura 6). De manera similar, esto sucede con el Sol, la Luna y cualquier objeto que se encuentre fuera de nuestra atmósfera. Vale destacar que este fenómeno también produce la ilusión de que los objetos se vean más grandes de lo que en realidad son, especialmente en el horizonte, donde los rayos del Sol atraviesan una mayor distancia a través de la atmósfera.

Que la trayectoria de los rayos dentro de la atmósfera se curve hace que recorran aún más distancia sobre ésta y le den más oportunidad de dispersar azules. Lo que queda, la diferencia entre toda la radiación visible que llega del Sol y los azules que se pierden por dispersión, es muy pero muy amarillo y rojo, es decir, muy naranja. Cuando



Figura 6. Foto de un lápiz parcialmente sumergido en agua.

Se han trazado un par de rectas para guiar al ojo y resaltar el ángulo de refracción que aparece entre lo que se observa fuera y dentro del agua (negro fuera, rojo dentro). El mismo fenómeno ocurre con los rayos solares que ingresan a la atmósfera y se curvan debido a su gradiente en el índice de refracción. Esto hace que podamos ver al Sol antes de que éste se encuentre físicamente sobre el horizonte.

estos rayos pobres en azules inciden sobre una nube, ésta no puede dispersar más que el naranja que le llega, ya no hay azul que dispersar, y la nube también se tiñe de naranja. Cuando esto pasa con muchas nubes al mismo tiempo y se amplifica con la superficie reflejante de una bahía tranquila, tenemos unos atardeceres espectaculares.

Lo blanco de las nubes

Ahora llegamos al límite de la teoría de Rayleigh. Su magnífica expresión matemática (ver expresión 1) no puede explicar el color blanco de las nubes, ni tampoco el blanco de la leche ni el de las dispersiones de látex que sirven de base para las pinturas, así como cualquier dispersión coloidal en general. El motivo subyacente es el mismo. Las nubes, la leche y otros coloides comparten una característica: están formados por regiones heterogéneas en cuanto a su índice de refracción y estas heterogeneidades tienen tamaños característicos de varias centenas de nanómetros, aproximadamente en la misma escala que

la longitud de onda de la radiación electromagnética visible (Greenler, 1980). En consecuencia, ya no es válido el supuesto de que la partícula causante de la dispersión es mucho más pequeña que la longitud de onda de la radiación incidente. Esto significa que habrá partes de la partícula expuestas a diferentes intensidades del campo eléctrico simultáneamente, lo que invalida sus resultados y complica en gran medida el tratamiento matemático. Además, lo que es más importante, la solución a este problema más complejo (que involucra la aparición de armónicos esféricos, los mismos que son parte de la solución de la ecuación de Schrödinger estacionaria para el átomo de hidrógeno) se vuelve prácticamente independiente de la longitud de onda de la radiación incidente. La intensidad dispersada es proporcional al cuadrado del diámetro de la partícula dispersora (o la región del espacio con índice de refracción diferente, ya que no necesariamente debe existir una partícula *per se*) y, en general, es mucho más intensa que la dispersión Rayleigh (Mie, 1908). Asimismo, la intensidad dispersada exhibe una fuerte dependencia angular, siendo mucho más intensa en la dirección de la luz incidente y hacia adelante que en otras direcciones, como a los lados o hacia atrás.

Luego, sin importar la longitud de onda que incida en un dispersor Mie (un dispersor de tamaño similar a la longitud de onda de la radiación incidente), la dispersión ocurre en la misma proporción que con otras longitudes de onda. Si llega radiación de todas las longitudes de onda visibles a un dispersor de este tipo (luz blanca), la proporción de un tipo de radiación (por ejemplo, amarilla) será la misma que tenía la radiación incidente. Por lo tanto, si la radiación incidente es blanca, como la que proviene del Sol, entonces la partícula se verá blanca. Esto explica por qué las nubes se ven blancas al mediodía, ya que el agua que las forma se condensa en gotitas de tamaño coloidal, que tienen varios cientos de nanómetros de diámetro (ver Figura 4). Además, esto también explica por qué el cielo puede tener tonalidades anaranjadas al atardecer, ya que los tonos azules de la radiación incidente se han agotado al colorear el resto del cielo.

Conclusiones

Desde los albores de la humanidad hemos contemplado el cielo con un profundo interés. Las primeras civilizaciones ya mostraban una fascinación por los astros, lo que influyó en el avance del conocimiento y en el desarrollo de la ciencia. Sin embargo, pasaron miles de años antes de que pudiéramos comprender por qué los planetas, a los que llamábamos errantes, seguían trayectorias tan peculiares en comparación con las estrellas fijas. También fue necesario mucho tiempo para observar y comprender los diversos colores de las estrellas y galaxias, y cómo éstos se relacionan con su composición química y sus movimientos relativos con respecto a nuestra posición en el universo. La luz que emana de estas enormes esferas de gas comprimido, que están en constante reacción nuclear, tarda en llegar a nosotros, a veces, un tiempo tan vasto como la propia edad del universo. Hoy en día, el telescopio espacial James Webb (Garner, 2022) nos brinda información valiosa sobre la formación de las primeras galaxias al especializarse en la observación de longitudes de onda visibles y largas, particularmente en la gama de los naranjas y rojos.

En cuanto a las banderas, con el transcurso del tiempo, la mayoría de los colores que aparecen en ellas han adquirido significados simbólicos. Por ejemplo, se dice que la rojigualda representa con su rojo a la sangre derramada por los españoles en defensa de su nación y con su amarillo (gualdo, un tipo de amarillo, como el de la flor de gualda) el oro y la riqueza del imperio. También el número de franjas de la bandera uruguaya corresponde a cada uno de los departamentos que componen al país (Bandera de Uruguay, s/f). Claro que hay un total de 19 departamentos y nada más 9 franjas —si contamos a las blancas que también hacen a su fondo—, pero eso es porque los departamentos se reprodujeron después de ser inventada la bandera, y a cualquier bandera le puede pasar algo así. Además, el sol no es cualquiera, es el Sol de Mayo (o Sol Incaico), el cual representa la independencia de los malos comunes a toda Hispanoamérica, los hispanos. Así que el verde de la bandera de México significa lo mismo que el

Sol de la de Uruguay (mismo que aparece en la bandera Argentina y en el estandarte presidencial del Perú). También dicen por ahí que el blanco y el azul significan esto y aquello, pero no dejan de ser interpretaciones modernas de sus colores originales. La verdad es mucho más simple: nadie en su sano juicio pintaría un trozo de cielo marrón y verde, porque el blanco y el azul son los colores que tenían que ser... los colores del cielo.

Referencias

- Bandera de España. (2024). En *Wikipedia*. Recuperado en junio de 2023 de https://es.wikipedia.org/wiki/Bandera_de_Espa%C3%B1a
- Bandera de México. (2024). En *Wikipedia*. Recuperado en junio de 2023 de https://es.wikipedia.org/wiki/Bandera_de_M%C3%A9xico
- Bandera de Uruguay. (2024). En *Wikipedia*. Recuperado en junio de 2023 de https://es.wikipedia.org/wiki/Bandera_de_Uruguay
- Bowdler, N. (2010). Las flores, como las ven las abejas. *BBC News*. https://www.bbc.com/mundo/noticias/2010/12/101213_vision_abejas_lp
- Cowen, R. (2012). Andromeda on collision course with the Milky Way. *Nature*. <https://www.nature.com/articles/nature.2012.10765>
- Dacke, M., Nilsson, D. E., Scholtz, C., Byrne, M. J. y Warrant, E. (2003). Insect orientation to polarized moonlight. *Nature*, 424(33). <https://doi.org/10.1038/424033a>
- Einstein, A. (1905). Zur elektrodynamik bewegter körper. *Annalen der Physik*, 891-921.
- Forde, T. C. (2022). What color are the stars? The astronomer's guide to seeing a stellar rainbow. *Love the Night Sky*. <https://lovethenightsky.com/what-color-are-stars/>
- Frisby, J. P. (1980). *Seeing: Illusion, brain and mind*. Oxford University Press.
- Garner, R. (2022). NASA's webb delivers deepest infrared image of universe yet. *NASA*. <https://www.nasa.gov/image-article/nasas-webb-delivers-deepest-infrared-image-of-universe-yet/>
- Gott III, J. R., Juric, M., Schlegel, D., Hoyle, F., Vogeley, M., Tegmark, M., Bahcall, M. y Brinkmann, J. (2005). A map of the universe. *The Astrophysical Journal*, 624(2), 463-484.
- Greenler, R. (1980). *Rainbows, halos, and glories*. Cambridge University Press.
- Halliday, D., Resnick, R. y Krane, S. K. (2007). *Física. Volumen 2*. Patria.
- Harrison, E. R. (1987). *Darkness at night: A riddle of the universe*. Harvard University Press.
- Mie, G. (1908). Beiträge zur optik trüber medien, speziell kolloidaler metallösungen. *Annalen der Physik*, 330, 377-445.
- NASA. (2012). Universe 101: Big bang theory. <https://map.gsfc.nasa.gov/universe/>
- Olbers, H. W. M. (1826). Ueber die durchsichtigkeit des weltraums. *Astronomisches Jahrbuch für das Jahr*, 110-121.
- Overbye, D. (2017). Cosmos controversy: The universe is expanding, but how fast? *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/2017/02/20/science/hubble-constant-universe-expanding-speed.html>
- Peebles, P. J. E. y Ratra, B. (2003). The cosmological constant and dark energy. *Reviews of Modern Physics*, 75(2), 559-606.
- Pérez, J. (2017). La astronomía de las banderas del mundo. *Ventura*. <https://vaventura.com/divulgacion/geografia/la-astronomia-las-banderas-del-mundo>
- Santini, B. (2015). The Science Behind Color Enhancement. Recuperado de <https://www.2020mag.com/article/the-science-behind-color-enhancement>
- Serway, R. A. y Faughn, J. S. (2005). *Fundamentos de física. Volumen 2*. Ediciones Paraninfo.
- Toth, N. y Schick, K. (2007). Overview of paleolithic anthropology. *Handbook of Paleoanthropology*, 3, 1943-1963.

Univisión. (2014). ¿Cómo funcionan los poderes de Superman? <https://www.univision.com/entretenimiento/geek/como-funcionan-los-poderes-de-superman>

Vision Boutique. (2021). Why can the human eye see more shades of green. <https://vision-boutique.com/why-can-the-human-eye-see-more-shades-of-green/>

Wolchover, N. y Duke, C. (2022). Dog vision: How do dogs see the world? LiveScience. <https://www.livescience.com/34029-dog-color-vision.html>

Young, A. T. (1981). Rayleigh scattering. Applied Optics, 20, 533-535.