

¿Por qué el cielo es azul de día?

Juan Segurola · Todos los derechos reservados

QUE · Artículo 003 · Preguntas sencillas, respuestas profundas · Versión 0.1 ES

En un día despejado, mira en una dirección alejada del Sol: el cielo suele ser azul. La luz que llega a tus ojos desde esa dirección no ha viajado directamente desde la superficie solar. Algo en su recorrido la ha desviado. La pregunta es por qué esa luz desviada tiene una distribución de longitudes de onda distinta de la del haz directo, y por qué nuestro sistema visual experimenta esa distribución como azul.

La matización «día despejado» importa. Las nubes, el polvo y la bruma pueden cambiar cuantitativamente la respuesta y, a veces, de forma visible. Estamos explicando el cielo azul habitual de la atmósfera terrestre, no asignando un color universal a todas las atmósferas o a todas las direcciones de observación.

1. Dos recorridos por la misma atmósfera

Imaginemos que separamos la luz que llega de una pequeña zona del cielo de la que llega en la dirección del Sol. Un espectrómetro distinguiría las longitudes de onda y la energía que llega en cada intervalo. Las dos distribuciones no tienen por qué coincidir. La dispersión traslada energía entre direcciones; la absorción retira energía del campo luminoso y la transfiere a la materia. Son procesos distintos.

Para la dispersión molecular de luz visible que nos ocupa, la aproximación básica es la dispersión elástica: la luz cambia de dirección sin el cambio de longitud de onda que transformaría luz roja en azul. La atmósfera desvía preferentemente parte de la luz de longitud de onda más corta que ya está presente en la luz solar. No fabrica fotones azules a partir de todos los demás colores.

Por tanto, una longitud de onda más corta puede contribuir con mayor intensidad a la luz dispersada lateralmente y, al mismo tiempo, reducirse más en un haz transmitido. Eso explica por qué son compatibles un cielo azul y un haz directo enrojecido. Sus colores describen recorridos distintos, no propiedades contradictorias de un mismo haz inalterado.

2. Qué predice la dependencia con la longitud de onda

En el régimen de Rayleigh, las estructuras dispersoras son mucho menores que la longitud de onda. El campo eléctrico induce una respuesta en la materia, y esa respuesta radia en otras direcciones. En una comparación simplificada, lejos de las resonancias de absorción y con una respuesta del material que varía lentamente, la sección eficaz de dispersión es aproximadamente proporcional a $1/\lambda^4$. La sección eficaz mide la eficacia con la que una molécula dispersa la luz incidente; no es la sombra geométrica de la molécula [1].

Tomemos 450 y 650 nanómetros como dos longitudes de onda visibles ilustrativas. Mantener fijos los demás factores da una razón entre secciones eficaces de $(650/450)^4$, aproximadamente 4,35. En este modelo, la longitud de onda más corta se dispersa con una intensidad varias veces mayor. Es una razón calculada, no una medición de cuántas veces más brillante parece una zona concreta del cielo azul que otra zona de cielo rojo.

La distinción es esencial. Calcular el brillo del cielo también requiere el espectro incidente, la abundancia molecular, el ángulo de dispersión, la atenuación antes y después del suceso de dispersión y cualquier dispersión adicional. La relación de cuarta potencia aporta un factor a ese cálculo. No es un espectro completo ni una teoría completa de la percepción del color.

Tampoco es una ley de potencias exacta para todos los gases en todas las longitudes de onda. El índice de refracción del gas varía con la longitud de onda, y la anisotropía molecular introduce correcciones. Jordan y sus colaboradores incluyen explícitamente factores de índice de refracción y despolarización en su tratamiento de la dispersión [1]. La ley elemental recoge la tendencia dominante sin sustituir esos refinamientos.

3. Pruebas más allá de una explicación plausible

El mecanismo puede ponerse a prueba sin tomar el azul del cielo como demostración de sí mismo. Jordan y sus colaboradores utilizaron una cavidad óptica de banda ancha para medir espectros de extinción de gases, entre ellos nitrógeno, oxígeno y aire. Las mediciones de dispersión que obtuvieron concordaban con los valores de la bibliografía dentro de la incertidumbre de medida [1]. Son mediciones de laboratorio, no una fotografía reconstruida de un cielo exterior.

Una cavidad óptica hace que la luz recorra una trayectoria efectiva mucho más larga que el propio aparato. Eso amplifica las pérdidas pequeñas lo suficiente para medirlas. Pero las pérdidas siguen necesitando interpretación: el estudio distingue las contribuciones de dispersión y absorción. Que un instrumento detecte menos luz transmitida no identifica, por ese solo hecho, el proceso responsable de cada fotón ausente.

La polarización aporta otra restricción. La luz del cielo puede estar parcialmente polarizada, con un patrón que depende de la dirección de observación respecto al Sol [2]. En una descripción ideal de dispersión única, para iluminación no polarizada y un dispersor isótropo, el grado de polarización lineal es $\sin^2\theta/(1 + \cos^2\theta)$, donde θ es el ángulo de dispersión. Alcanza su máximo ideal a 90° . Los cielos reales no tienen por qué alcanzar ese máximo: la anisotropía molecular, los aerosoles y la dispersión múltiple modifican el resultado.

La cuestión no es que una medición de polarización identifique de forma única toda la atmósfera. Es que la intensidad, la dependencia espectral y la polarización deben ser compatibles entre sí. Un mecanismo que solo produjera la palabra «azul», pero predijera un comportamiento angular incorrecto, sería incompleto.

4. ¿Por qué no violeta?

La preferencia por las longitudes de onda cortas continúa hacia el violeta, por lo que «las longitudes de onda más cortas se dispersan más» no basta para determinar el color percibido. La respuesta también depende de cuánta luz hay disponible en cada longitud de onda y de la respuesta de la visión humana en función de esa longitud. La explicación de la NASA señala explícitamente la diferencia de sensibilidad visual entre el azul y el violeta [3].

Una zona de cielo azul no suele ser monocromática. Nos envía una mezcla de longitudes de onda visibles. Las respuestas de nuestros conos y el procesamiento visual posterior convierten esa mezcla en una experiencia de color. La mayor sección eficaz de dispersión y el nombre de color asignado a la mezcla resultante son magnitudes diferentes. Una predicción numérica completa del color combinaría el espectro entrante, la transferencia atmosférica y un modelo de observador.

Por tanto, la razón 4,35 no predice un tono concreto de azul. En esa razón ilustrativa no se ha introducido ningún espectro solar medido, perfil atmosférico ni cálculo de igualación de colores. Su función es más limitada: mostrar la magnitud de la preferencia por una longitud de onda en un modelo controlado.

5. Por qué el cielo no tiene un único azul

Los aerosoles y las gotitas de las nubes introducen estructuras dispersoras con tamaños y composiciones distintos de los de las moléculas utilizadas en la explicación más sencilla. Su dispersión angular y espectral puede diferir sustancialmente. Las trayectorias más largas por la atmósfera también acumulan más atenuación y más oportunidades de dispersión. Por ello, la misma descripción física permite un azul saturado en una dirección y una apariencia más pálida en otra.

Un cálculo que solo incluye un suceso de dispersión es más útil cuando la dispersión repetida constituye una corrección limitada. En condiciones ópticamente más espesas, la luz puede cambiar de dirección varias veces antes de llegar al observador. Entonces, la dirección final no identifica un único suceso con un solo rayo entrante. La transferencia radiativa sigue las contribuciones combinadas.

Por eso, atribuir el cielo azul habitual a un reflejo del océano pasa por alto el mecanismo principal. Una masa de agua puede reflejar la luz del cielo, pero la dispersión molecular no requiere un océano bajo el observador. La reflexión de la superficie puede influir en radiancias concretas sin eliminar la necesidad de explicar la dispersión de la propia atmósfera.

6. Qué establece la explicación

El núcleo bien establecido es una conexión entre tres hechos: la luz solar contiene un intervalo de longitudes de onda; las moléculas del aire dispersan preferentemente las longitudes de onda visibles más cortas; y la visión humana responde a la mezcla resultante. La espectroscopia y la polarización restringen esa explicación con independencia del nombre de un color.

La incertidumbre entra en una predicción para un cielo concreto a través de magnitudes como las propiedades de los aerosoles, las trayectorias atmosféricas y el tratamiento de la dispersión múltiple. Eso no significa que se desconozca el mecanismo cotidiano. Significa que explicar por qué el cielo suele ser azul es una tarea menos exigente que predecir su espectro y su aspecto exactos en cada punto y momento.

La pregunta se responde, por tanto, mediante la atmósfera y el observador. La atmósfera modifica el espectro direccional que llega al ojo. El ojo no mide ese espectro como una tabla de longitudes de onda; contribuye al color que percibimos. Mantener diferenciados esos pasos explica el azul sin tratarlo como un pigmento del aire ni como una invención arbitraria de la mente.

Lectura relacionada

IDE-019 introduce la luz como concepto físico más amplio. QTC-002 aborda la oscuridad del cielo nocturno, una pregunta diferente. Ambas son lecturas asociadas opcionales.

Referencias

- [1] Jordan, N. et al. A broadband cavity-enhanced spectrometer for atmospheric trace gas measurements and Rayleigh scattering cross sections in the cyan region (470–540 nm). *Atmospheric Measurement Techniques* 12, 1277–1293 (2019). <https://doi.org/10.5194/amt-12-1277-2019>
- [2] NASA Goddard. Rayleigh Scattering. Notas docentes de ciencias atmosféricas, sección «Rayleigh Scattering and Polarization». https://acd-ext.gsfc.nasa.gov/anonftp/acd/daac_ozone/Lecture4/Text/Lecture_4/rayleigh.html
- [3] NASA Science. Wave Behaviors. https://science.nasa.gov/ems/03_behaviors/