

El cielo es azul y el atardecer es rojo (dispersión de Rayleigh)

Antonio Rivas. IES Pontepedriña (Santiago de Compostela)

Como sabemos, cuando una onda choca con un obstáculo se producen fenómenos que se suelen etiquetar como de difracción (aunque también se suele recurrir a hablar de interferencia -de hecho, la distinción no es clara¹-).

La condición que se suele citar para que se dé uno de tales fenómenos es que las dimensiones del obstáculo (o cuando menos las de la escala de estudio) sean comparables, en orden de magnitud, con las de la longitud de onda.

Pero, ¿qué sucede si el obstáculo es mucho menor que la longitud de onda? La respuesta no es única, sino que depende del tipo de onda y de las características de las partículas. Un caso particular interesante es el que se produce con la luz.

Como se trata de una onda electromagnética, debemos tener presente que la materia está constituida por cargas. Si la frecuencia de la luz es diferente de las que corresponden a las frecuencias naturales del material (lo que en términos de fotones equivale a decir que la energía de éstos no sintonice con la diferencia entre dos niveles energéticos) entonces no será absorbida por el material. Pero eso no significa que no interactúe con éste.

En los términos ondulatorios clásicos que estamos manejando, podemos afirmar que el campo electromagnético oscilante inducirá movimientos en las partículas cargadas que componen la materia y que causarán en ésta una polarización oscilante, al ritmo que marca la propia onda electromagnética. Esto, a su vez, los convierte en reemisores de la misma onda. En términos sencillos podemos decir que la partícula actúa como si tomase la onda y la devolviese.

Ahora bien, la eficiencia de este proceso tiene varias características interesantes. Una de ellas es que, como es lógico, dependerá de la polarizabilidad del material, es decir, de la facilidad que tenga para ser deformado (eléctricamente) por un campo.

La segunda es que es direccional: la intensidad de la onda reemitida es máxima en la dirección de propagación (en ambos sentidos) y mínima, pero no nula, en las direcciones perpendiculares. En concreto, si denotamos por θ al ángulo formado entre la dirección considerada y la de incidencia, la intensidad está gobernada por $1 + \cos^2 \theta$.

No obstante, también debemos tener presente que aunque la eficacia es doble para $\theta=0$ que para $\theta=90^\circ$, en términos coloquiales, tenemos muchas más direcciones en el entorno de 90° que en el de 0° .

La tercera es la longitud de onda: la intensidad de la onda reemitida es mayor cuanto menor sea la longitud de onda. Además, la dependencia es muy fuerte, pues interviene nada menos que la cuarta potencia de esta magnitud.

¹ Por ejemplo, Hecht en su "Óptica" (en la sección 10.1) escribe lo siguiente: "Si en el transcurso del encuentro con un obstáculo transparente u opaco se altera una región del frente de onda en amplitud o en fase, ocurrirá una difracción. Los varios segmentos del frente de onda que se propagan más allá del obstáculo interfieren para producir la distribución de densidad de energía particular conocida como patrón de difracción. No hay distinción física significativa entre interferencia y difracción. Sin embargo, se ha vuelto común, aunque no siempre apropiado, hablar de interferencia cuando se está considerando la superposición de solamente unas pocas ondas y difracción cuando se está tratando un gran número de ondas."

Esto implica, en términos de luz visible, que el violeta (400 nm) será reemitido con una eficacia unas 9 veces mayor que el rojo (700 nm). Esta diferencia tan acusada nos permitirá decirle a nuestra abuela, si queremos trasladarle esta explicación, que el violeta será fuertemente afectado por los pequeños obstáculos, mientras que el rojo apenas los notará.

Como en Física ondulatoria empleamos el término dispersión para referirnos a influencias dependientes de la frecuencia de la onda, y además en este caso no hay absorción, este fenómeno forma parte de los llamados de dispersión elástica, y concretamente se denomina "dispersión de Rayleigh".

Para los amigos de las fórmulas (y por aquí solemos ser muchos), las dependencias anteriores se pueden resumir, para partículas que tengan un radio R y una polarizabilidad α , mediante

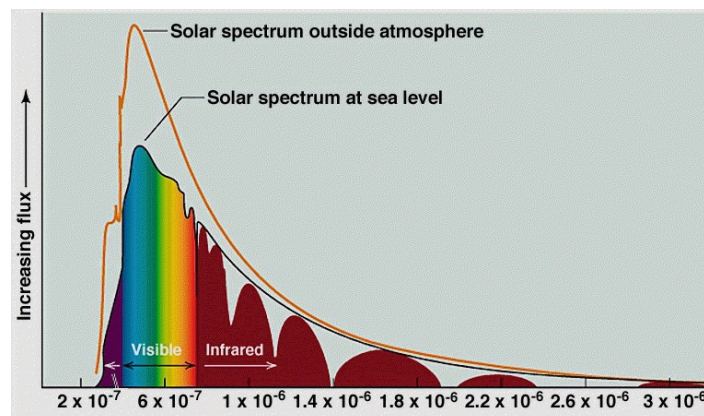
$$I = I_0 \frac{8\pi^4 \alpha^2}{\lambda^4 R^2} (1 + \cos^2 \theta)$$

Esta expresión es, en realidad, un caso particular de una teoría más amplia de la dispersión de ondas electromagnéticas por partículas esféricas, y que hace uso, cómo no, de las ecuaciones de Maxwell: la solución de Lorenz-Mie (o dispersión de Mie).

Retomemos el comportamiento de la luz visible. Como dijimos antes, al atravesar un medio material transparente en el que haya pequeñas partículas, como es el caso de los gases, la luz roja apenas será dispersada, mientras que la azul sí lo será.

Por tanto, si tenemos un haz de luz blanca que incida formando un ángulo de 90° con la dirección de observación, apreciaremos una cierta dominante azul debido a la fracción de esa parte del espectro que es dispersada lateralmente.

Por cierto, nuestros cielos no son violetas por la simple razón de que la luz del Sol no es estrictamente blanca, en el sentido de que hay que tener en cuenta las intensidades de las diferentes frecuencias, como nos muestra esta figura².



Cuando miramos en la dirección del Sol los efectos de la dispersión serán más notorios cuanto mayor sea la distancia atmosférica que deba atravesar la luz. El motivo por el que son rojos los atardeceres es precisamente esa fracción de luz que es desviada lateralmente con mayor eficacia y

2 Tomada de <http://www.astro.virginia.edu/~kej7a/Teaching/AST313/Lectures/Lecture13.html>

que causa la usual tonalidad azulada del cielo. La luz que nos llega entonces es la que resulta de esa supresión.

--- 000 ---

Es interesante destacar que el tamaño de las partículas aunque sí influye sobre la dispersión de Rayleigh no afecta a la proporción que acabamos de comentar para los diferentes colores.

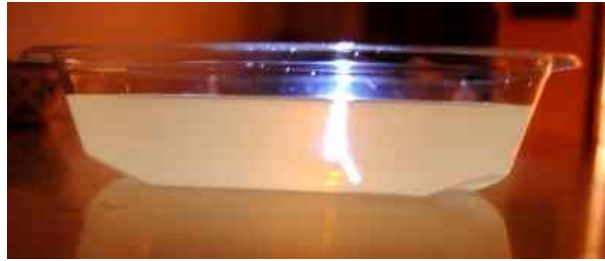
Hay un experimento casero muy sencillo que podemos realizar y que seguro que le gustará a nuestras abuelas. Los materiales que necesitamos son éstos: una bandeja plástica transparente como las que a veces usan en los supermercados para embalar fruta, agua, un poco de leche y una linterna.



Homogeneizamos revolviendo un poco, apagamos la luz del cuarto, encendemos la linterna, miramos de lado y veremos un tono azulado al mirar de lado (aunque se ve en la foto, ésta sólo es para indicar cómo se debe poner la linterna; es más notorio mirando de lado y de un modo estrictamente perpendicular).



Y de frente tenemos nuestro propio atardecer...



Nota: las imágenes anteriores (que son de mi propia cosecha) tienen dominantes de color debidas a la iluminación (ambiente en la primera, flash en las otras dos) y la corrección de balance de blancos que hace la cámara fotográfica. Sólo son ilustrativas. De todos modos, como el experimento es muy barato no te conformes con mirarlas, ¡hazlo!.

---000---

Y para terminar, una pregunta interesante ¿por qué en Marte el cielo es rojo y sus atardeceres son azules?³.



Uno juraría que ese hermoso atardecer azul es debido a una dispersión de Rayleigh pero que es justamente al revés de lo dicho antes!

La razón es que el color del cielo de Marte *no* se debe a la dispersión de Rayleigh. Es más, Marte apenas tiene atmósfera!

¿Entonces? Muy sencillo: ciertamente Marte tiene una atmósfera muy rala, pero muuucho más polvorienta, en comparación, que la terrestre. En concreto, tiene en suspensión partículas minerales de óxido de hierro, que son las responsables (por absorción) de la coloración parduzca, algo, por cierto, que acorta la vida de los equipos alimentados por paneles fotovoltaicos, por el polvo que poco a poco se va depositando en ellos.

Ya sabes, para polvo en todas partes, Marte...

3 Crédito de la imagen: NASA-JPL