

Esparcimiento de Rayleigh*

Alejandro del Mazo Vivar

I.E.S. Francisco Salinas. Salamanca. España.

mazovivar@gmail.com

[Recibido en noviembre de 2015, aceptado en marzo de 2016]

La luz modifica su trayectoria y su estado de polarización cuando interacciona con un medio cuyas partículas tienen un tamaño mucho más pequeño que la longitud de onda. El fenómeno es más intenso para los colores de menor longitud de onda. De ahí que, en el caso de la luz blanca, se vean más afectados los colores de la región azul-violeta del espectro. Algunos de los experimentos presentados en este artículo están relacionados con el estado de polarización de la luz esparcida por medios coloidales.

Palabras clave: Coloide; Esparcimiento; Longitud de onda; Polarización.

Rayleigh scattering

Light changes its path and the polarization state if it interacts with a medium whose particles are much smaller than its wavelength. The phenomenon is most intense for colours of shorter wavelength. Consequently, for white light, the colours of the blue-violet region of the spectrum are most affected. Some of the experiments presented in this article are related to the polarization state of dispersed light through colloidal media.

Keywords: Colloid; Scattering; Wavelength; Polarization.

Para citar este artículo: del Mazo Vivar A. (2016) Esparcimiento de Rayleigh. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 13 (2), 505-510. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10498/18312>

Introducción

La causa del color azul del cielo ha sido objeto de reflexión y estudio por parte de artistas y científicos desde hace mucho tiempo. En el siglo XIX diversos estudiosos del problema sospecharon que el color del cielo y el que presentaban los coloides iluminados bajo determinadas condiciones eran fenómenos parecidos, con una explicación común.

Un coloide es una mezcla en la que una sustancia, con partículas de tamaño comprendido aproximadamente entre 200 nm y 1 nm, se dispersa en otra sustancia que es la fase dispersante. El valor de 200 nm se sitúa en el límite del poder de resolución del microscopio óptico, lo que imposibilita la observación de las partículas coloidales con este tipo de microscopio, bajo iluminación axial. En el caso de aquellos coloides en los que el medio dispersante es un líquido, el sistema presenta un aspecto opalescente. Cuando un coloide se examina bajo el microscopio óptico ordinario aparece completamente transparente; pero, si se observa iluminándolo intensamente en dirección normal al eje óptico del instrumento, las partículas dispersas se hacen visibles. Cuando el examen del coloide iluminado se hace directamente, sin ayuda de microscopio, la trayectoria de la luz se dibuja claramente a lo largo de la mezcla y el fenómeno es conocido como *efecto Tyndall*.

La idea de que el color del cielo podía deberse a partículas presentes en la atmósfera es muy antigua. En el siglo XVIII, Pierre Bouguer se acercó bastante a lo que acabaría siendo la explicación final, al considerar que la luz que atraviesa la atmósfera se ve afectada por las moléculas del aire, que desvían más los rayos azules, a los que atribuía «menos fuerza» que los rojos; aunque, por entonces, Johann Lambert se decantaba por la existencia de partículas

* Se utiliza el término *esparcimiento* en vez de *dispersión*, que se reserva para hablar de la separación de las diferentes longitudes de onda de una radiación producida por un prisma o red de difracción.

heterogéneas en el aire y Leonhard Euler se movía entre las impurezas del aire y posibles partículas azules (Pesic 2007).

En 1853 E. W. von Brücke preparó disoluciones de resinas en alcohol que, trasladadas al agua, mostraban tonalidades azuladas parecidas a las del cielo (Pesic 2007). Brücke era consciente del vínculo entre el tamaño de las partículas y la longitud de onda de la luz dispersada.

John Tyndall (1868) analizó exhaustivamente el estado de conocimientos acerca del problema del cielo en aquel momento, dedicando una atención especial a la polarización que muestra a 90° de la posición del Sol. Por entonces, Tyndall (1870) daba a conocer sus experimentos de la acción de la luz sobre diversas sustancias en las que se mostraba siempre, aunque solo durante unos momentos, la misma claridad azulada que exhibe el cielo. Más adelante, Tyndall (1873) destacó la importancia de los experimentos de Brücke y explicó cómo las pequeñas partículas deben esparcir en mayor medida las luces de menor longitud de onda, como son las azules.

La interpretación final del problema del azul de cielo llegó con Lord Rayleigh (John William Strutt) en una etapa transcurrida entre 1871 y 1899. En su primer estudio (Strutt 1871) realizaba un análisis dimensional donde concluía que el esparcimiento de la luz por pequeñas partículas era inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda. Aunque seguía sin resolver el problema de cuál es la naturaleza de tales partículas, descartó que pudiera deberse a la presencia de burbujas de agua en zonas altas de la atmósfera, como había sugerido Rudolf Clausius. Por aquel entonces, Maxwell, que seguramente sospechaba que el esparcimiento de la luz era debido simplemente a las moléculas del aire (Pesic 2007), pidió a Rayleigh que aplicara la teoría electromagnética al estudio del esparcimiento por partículas extremadamente pequeñas (Strutt 1881). Unos años más tarde Rayleigh dejó claro que no son necesarias partículas en suspensión para explicar el azul del cielo y que las propias moléculas del aire son las responsables del fenómeno (Strutt 1899).

La teoría de Rayleigh solo es aplicable cuando el tamaño de las partículas es muy inferior al de la longitud de onda. A medida que ese tamaño aumenta debe usarse la teoría de Mie, que prevé, para la luz esparcida, una menor dependencia con la longitud de onda. Eso explica, por ejemplo, el color de las nubes, o que el color azulado del humo expulsado rápidamente por un fumador sea, sin embargo, más blanco cuando el humo se ha mantenido durante un tiempo en la boca y el tamaño de las partículas ha aumentado debido a la humedad (Minnaert 1993).

Si el esparcimiento de la luz afecta en mayor medida a las longitudes de onda más cortas, ¿por qué el cielo se ve azul y no violeta? En la explicación están presentes otros dos factores (Bohren y Fraser 1985): las características de la luz solar que llega a la atmósfera y la sensibilidad del ojo humano a los diferentes colores de la luz visible. Por una parte, el espectro de la luz solar muestra un máximo de intensidad en torno a 460 nm (azul). Además, la *eficacia luminosa* del ojo humano, en condiciones de alta luminosidad (visión fotópica), es máxima para la luz verde de 550 nm (CIE 1990). La combinación de estos factores explica que el cielo se vea azul por el ojo humano.

Si se quiere diseñar experimentos en medio líquido para mostrar el esparcimiento Rayleigh y algunas de sus propiedades más importantes, hay que escoger medios que satisfagan las condiciones descritas; es decir, partículas muy pequeñas y disoluciones muy diluidas. Estos aspectos de la interacción de la luz con la materia pueden abordarse ya en niveles preuniversitarios. Las características más importantes de la luz se conocen desde los últimos cursos de enseñanza secundaria, lo que resulta suficiente para alcanzar una comprensión básica de los fenómenos que nos ocupan. Además, se cuenta con recursos y materiales experimentales muy asequibles que facilitan este acercamiento.

Medios coloidales

El uso de medios tales como azufre coloidal, gelatina y microesferas de látex para observar el esparcimiento Rayleigh ofrece muchas posibilidades (Zare 1995). La condición que se requiere es que el tamaño de las partículas sea bastante menor que la longitud de onda de la luz con que se ilumina. Aquí se propone y explica el uso de un coloide de poliestireno, muy estable en el tiempo, cuya preparación es sencilla. Para obtenerlo se toman, aproximadamente, 15 cm³ de poliestireno expandido y se disuelven en unos 10 mL de acetona. Se vierte esta disolución en 1 L de agua, sin dejar de agitar la mezcla, con lo que ésta adquiere inmediatamente un leve aspecto opalescente. El coloide formado puede conservarse indefinidamente en un recipiente cerrado.

Esparcimiento y longitud de onda

Según demostró Lord Rayleigh, si se ilumina con luz un medio que contiene partículas de un tamaño mucho menor que la longitud de onda λ , la intensidad I esparcida en una determinada dirección es inversamente proporcional a la cuarta potencia de la longitud de onda: $I \propto \lambda^{-4}$.

Para comprobar la dependencia de la intensidad esparcida con la longitud de onda se llena un vaso de precipitados de 1 L con el coloide de poliestireno que se ha preparado previamente. Cuando se ilumina desde arriba con un láser rojo (658 nm) y con un láser violeta (405 nm), se observa que la luz violeta se esparce más intensamente que la luz roja (figura 1).

En ambos punteros se indica que su potencia es inferior a 1 mW. En el supuesto de que las intensidades luminosas de los láseres rojo y violeta fueran iguales, la relación de las intensidades esparcidas por esas luces sería:

$$\frac{I_{\text{violeta}}}{I_{\text{rojo}}} = \left(\frac{\lambda_{\text{rojo}}}{\lambda_{\text{violeta}}} \right)^4 = \left(\frac{658 \text{ nm}}{405 \text{ nm}} \right)^4 \approx 7.$$

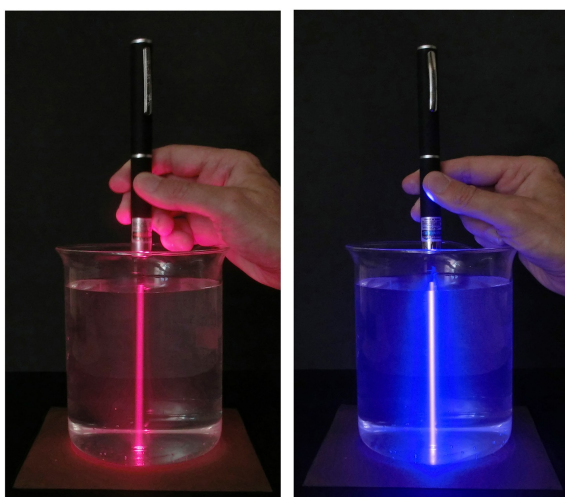


Figura 1. Un coloide de poliestireno se ilumina desde arriba con un láser rojo (izquierda) y con un láser violeta (derecha). La luz violeta sufre un esparcimiento mayor que la luz roja.

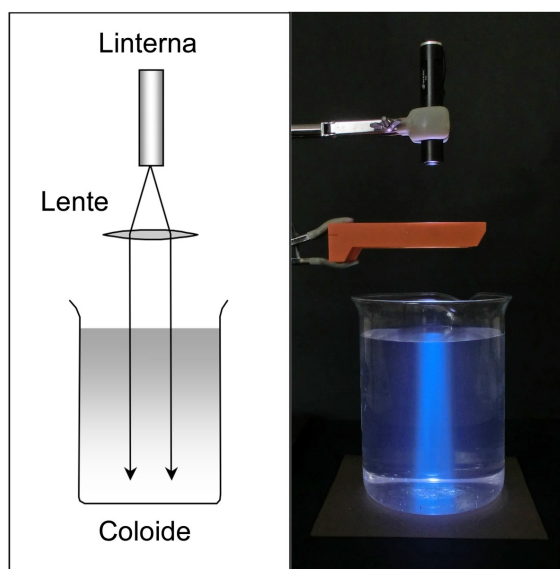


Figura 2. El coloide de poliestireno se ilumina desde arriba con una linterna de luz blanca, cuya luz ha sido parcialmente colimada con una lente convergente. La luz esparcida es de color azulado.

No obstante, es preciso tener en cuenta que el fenómeno ha de ser observado por el ojo, cuya eficacia luminosa, como se ha señalado anteriormente, es máxima para 550 nm y decrece significativamente para longitudes de onda inferiores y superiores a este valor. De los datos de eficacia luminosa se deduce que ésta es, aproximadamente, dieciséis veces menor para la luz de 405 nm que para la de 658 nm. Por tanto, aunque la observación visual muestra ya un mayor esparcimiento para la luz violeta, el grado en el que se percibe subjetivamente el fenómeno es inferior al de su magnitud real.

Esparcimiento de luz blanca

Puesto que los colores de distintas longitudes de onda son esparcidos en diferente grado, es interesante observar cómo se comporta un medio iluminado con luz blanca. El humo es un buen medio para observar el esparcimiento (Minnaert 1993) y el comportamiento está condicionado por el tamaño de sus partículas. Se ha señalado (Lewin 2012) el color azul esparcido por humo de cigarrillos en un recinto cuya única fuente luminosa es la de un foco blanco iluminándolo verticalmente. El experimento puede repetirse sustituyendo los cigarrillos por barras de incienso.

Cuando se utiliza el coloide de poliestireno, el vaso de precipitados que lo contiene se ilumina desde arriba con una linterna de luz blanca (puede colimarse parcialmente la luz con una lente convergente, situando la fuente luminosa en el foco de la lente). Las trayectoria de la luz se ve de color azulado debido al mayor esparcimiento de las longitudes de onda más cortas (figura 2). Cuando se eleva ligeramente el vaso y bajo él se coloca una superficie blanca, se observa que la luz que incide sobre ella muestra una tonalidad amarillenta, al haber perdido la luz original parte de las componentes de menor longitud de onda.

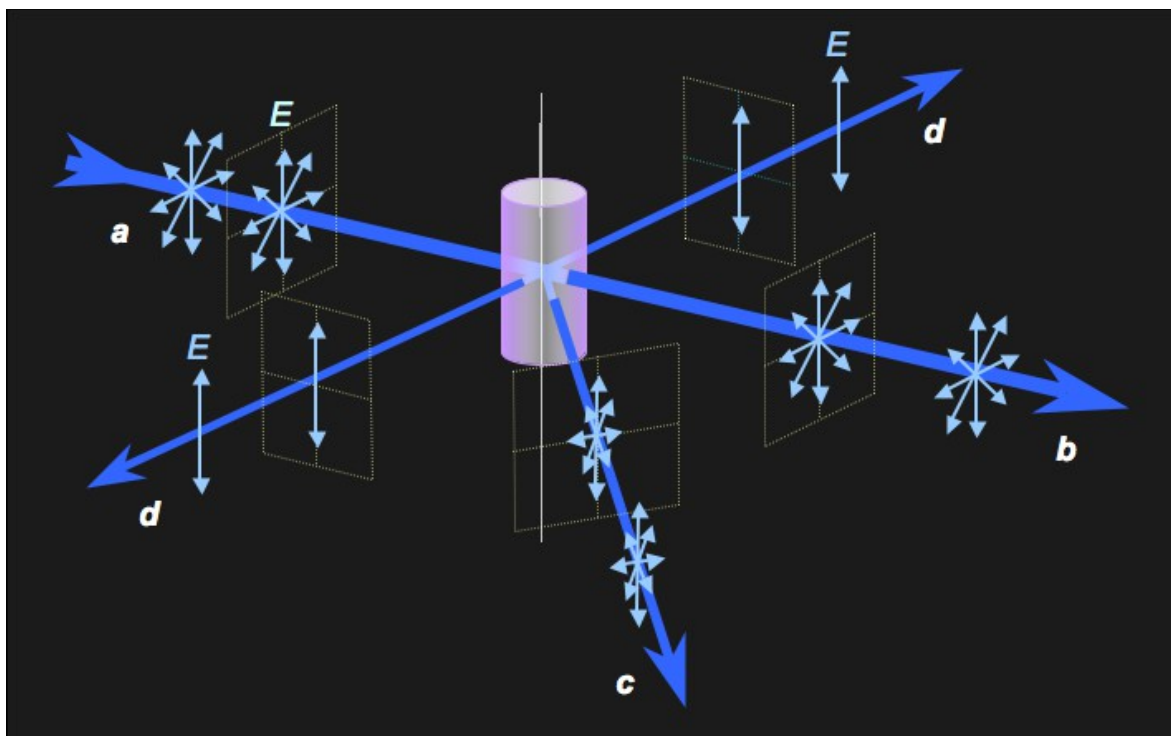


Figura 3. (a) Un coloide se ilumina lateralmente con un haz de luz no polarizada. (b) La luz transmitida tampoco está polarizada. (c) Los rayos esparcidos están parcialmente polarizados. (d) Los rayos normales al haz primario se encuentran completamente polarizados. E representa la orientación del campo eléctrico.

Polarización por esparcimiento

Si se ilumina con luz no polarizada un medio que presenta esparcimiento Rayleigh, la luz transmitida sigue siendo no polarizada, pero la luz esparcida se muestra parcialmente polarizada (Hecht y Zajac 1986, Zare 1995). La polarización es mayor a medida que aumenta el ángulo que forma un rayo esparcido con el rayo primario. Los rayos esparcidos normales al rayo primario se encuentran totalmente polarizados (figura 3).

La polarización se pone de manifiesto iluminando el coloide con luz monocromática o con luz blanca. En este trabajo se ha elegido blanca y la luz esparcida se observa con un polarizador lineal en una dirección normal a la dirección de la iluminación. Existe una posición óptima del polarizador que deja pasar la luz esparcida (figura 4a), pero al girarlo 90° , la luz esparcida se bloquea casi completamente (figura 4b).

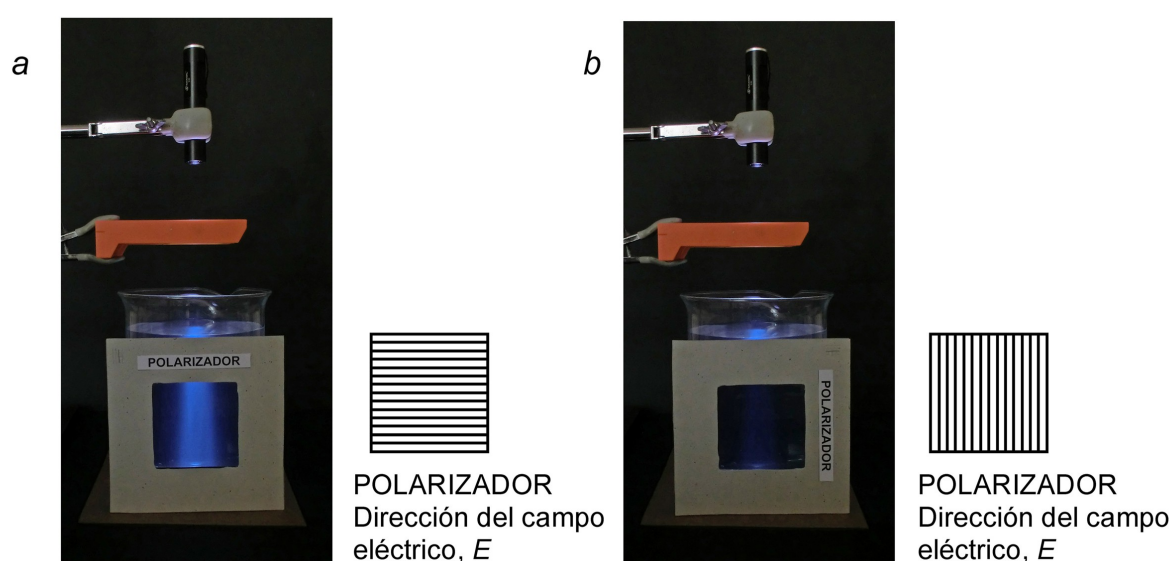


Figura 4. El coloide se ilumina con luz blanca. La luz esparcida en dirección normal a la de iluminación se observa a través de un polarizador lineal. (a) La intensidad de luz transmitida a través del filtro es máxima. (b) Si el filtro se gira 90° respecto a la posición anterior la luz queda bloqueada casi en su totalidad.

Conclusiones

El origen del color del cielo fue explicado por Rayleigh como consecuencia del esparcimiento de la luz solar por las moléculas de los gases presentes en la atmósfera. Las radiaciones visibles de menor longitud de onda experimentan un esparcimiento superior a las de mayor longitud de onda, lo que confiere al cielo su tonalidad característica.

Por otra parte, la luz esparcida por la atmósfera presenta cierto grado de polarización. La luz procedente de las regiones del cielo que forman 90° con la posición del Sol exhibe máxima polarización. La figura 5 muestra fotografías de 180° a lo largo de la línea del horizonte, tomadas al atardecer con polarizador lineal. En la figura 5a, con polarización vertical del campo eléctrico, el aspecto del cielo es el que se observaría con el ojo desnudo. En la figura 5b, con polarización horizontal del campo eléctrico, se pone de manifiesto la polarización parcial de la luz a 90° .

Referencias

Bohren C. F., Fraser A. B. (1985) Color of the Sky. *The Physics Teacher* 23 (5), 267-272.

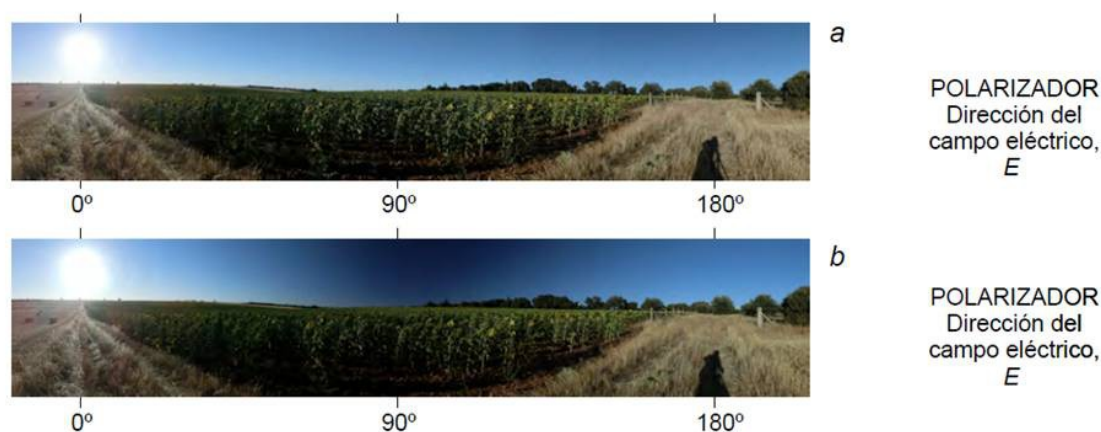


Figura 5. Fotografías panorámicas de 180° con el Sol próximo a la línea del horizonte, tomadas con filtro polarizador. (a) Con dirección de polarización del campo eléctrico vertical. (b) Con dirección de polarización del campo eléctrico horizontal. En este caso el cielo se observa más oscuro a 90° del Sol.

Hecht E., Zajac A. (1986) *Óptica*. Wilmington. Addison-Wesley Iberoamericana.

CIE (1990) *CIE 1988 2° Spectral Luminous Efficiency Function for Photopic Vision*.

Lewin W. (2012) *Por amor a la física*. Barcelona. Debate.

Minnaert M. (1993) *Light and Color in the Outdoors*. New York. Springer-Verlag.

Pesic P. (2007) *El cielo en una botella. Historia de la pesquisa sobre el azul del firmamento*. Barcelona. Gedisa.

Strutt J. W. (1871) On the Light from the Sky, its Polarization and Colour. *Philosophical Magazine* XLI, 107-120; 274-279.

Strutt J. W. (1881) On the Electromagnetic Theory of Light. *Philosophical Magazine* XII, 81-101.

Strutt J. W. (1899) On the Transmission of Light through an Atmosphere containing Small Particles in Suspension, and on the Origin of the Blue of the Sky. *Philosophical Magazine* XLVII, 375-384.

Tyndall J. (1868) On the Blue Colour of the Sky, the Polarization of Skylight, and on the Polarization of Light by Cloudy Matter Generally. *Proceedings of the Royal Society* 17, 223-233.

Tyndall J. (1870) On the Action of Rays of High Refrangibility upon Gaseous Matter. *Philosophical Transactions of the Royal Society* 160, 333-365.

Tyndall J. (1873) *Six Lectures on Light*. London. Longmans, Green.

Zare R. N., Spencer B. H., Springer D. S., Jacobson M. P. (1995) *Laser experiments for beginners*. Sausalito. University Science Books.