

Capítulo Quinto

SONIDO Y LUZ

161. El trueno.

Observando un relámpago o escuchando el trueno, ¿será posible determinar la distancia hasta la descarga eléctrica que los produce?

El trueno se desplaza por medio de las llamadas ondas explosivas cuya amplitud de oscilación es bastante considerable, y no mediante ondas acústicas ordinarias. En general, las primeras se diferencian mucho de las segundas, y sólo poco antes de extinguirse se descomponen en ondas sonoras. En primer lugar, las ondas explosivas son notablemente más rápidas que el sonido, además, su velocidad no es constante, sino que disminuye drásticamente a medida que cambian de estructura y se destruyen. Mediante experimentos realizados en tuberías se estableció que la velocidad de propagación de dichas ondas alcanza 12 ó 14 km/s, o sea, supera unas cuarenta veces la del sonido.

El rayo engendra ondas explosivas que en un principio viajan en la atmósfera más rápido que el sonido. En esta fase las percibimos como un chasquido. Un trueno fuerte y brusco, no precedido de ruido sordo, que se oye inmediatamente después de la fulguración (o, a veces, al mismo tiempo que la vemos), es engendrado por una onda explosiva que aún no se ha destruido. Semejantes descargas indican que la chispa se ha producido muy cerca de nosotros, pues sólo a distancia corta la onda explosiva tiene estructura original.

Otro género de trueno, acompañado de descargas sordas características, que se debilitan y amplifican alternadamente, se escucha al cabo de cierto intervalo de tiempo después de que se ve el rayo, lo que prueba que su fuente está alejada a una distancia considerable. Se equivocan los que piensan que es posible determinar la distancia hasta la descarga partiendo del espacio de tiempo transcurrido entre la chispa y el trueno (multiplicando el número de segundos por la velocidad del sonido), ya que la onda de aire que transporta el sonido, viaja con una velocidad variable, recorriendo la parte inicial de esta distancia a una velocidad supersónica y el resto, con la del sonido.

Lo que acabamos de exponer sobre el trueno, no tiene nada que ver con el sonido del disparo: al disparar un cañón, la onda explosiva se convierte en una onda acústica ordinaria a dos metros de la pieza; por ello, es posible determinar la velocidad del aire a base del disparo de cañón.

162. El sonido del viento.

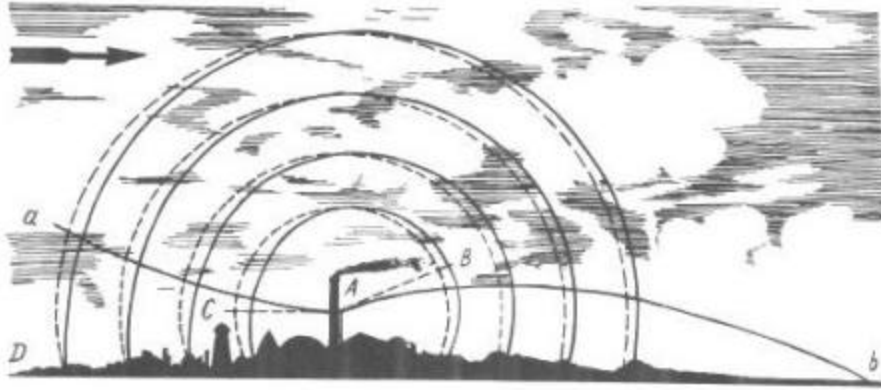
¿Cómo explicaría usted el hecho de que el viento amplifica el sonido?

A continuación ofrecemos un pasaje relativo a este problema, tomado del libro *Historische Physik* de Lacour y Appel.

«Es sabido que el sonido se oye mejor cuando el viento es favorable, y peor cuando es contrario. Por regla general, sólo se acostumbra explicar este fenómeno con el hecho de que en dirección del viento la velocidad de éste se suma a la del sonido. Nos daremos cuenta de que semejante explicación es insuficiente si recordamos que el movimiento del aire con una velocidad de 10 m/s se siente como un viento bastante fuerte. Pero esta magnitud no influye notablemente en la intensidad del sonido, pues, de hecho, se trata de un aumento o disminución poco considerables de su velocidad, de orden de un 3 %.

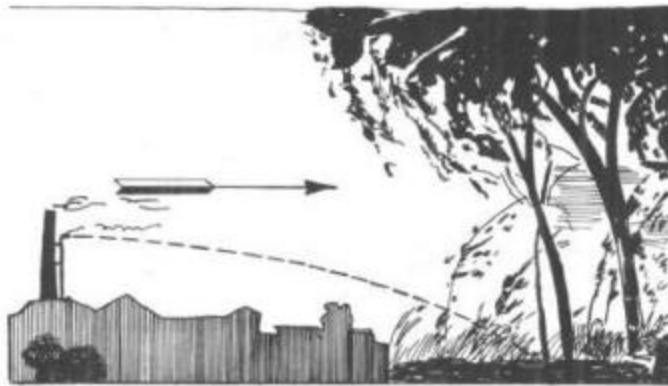
El físico inglés J. Tyndall explica este fenómeno de la manera siguiente. La velocidad del viento casi siempre aumenta en función de la altitud. Por consiguiente, las ondas acústicas que se propagan a cierta altura y cuya superficie en el ambiente tranquilo suele ser esférica (líneas de trazos en la figura), cambian de forma con mayor velocidad en dirección del viento (según indica la flecha) que las que se desplazan junto a la superficie terrestre. Por

esta razón tienen forma parecida a la que viene representada por las líneas continuas en la figura. Como en cada punto el sonido se propaga perpendicularmente a la superficie de la onda, el que procede del punto A en dirección AC no podrá llegar hasta el punto D, sino que pasará por encima de él siguiendo la línea Aa, por lo cual el observador que se encuentra en dicho punto, no lo oirá.



El viento deforma las ondas acústicas

Al contrario, el sonido emitido en la dirección AB, sigue la curva Ab, la cual no deja de ser perpendicular a la superficie de la onda. Por ello, el observador que se encuentra en el punto b, podrá oírlo; todos los sonidos emitidos por A en una dirección inferior a AB serán desviados de la misma manera y alcanzarán la superficie terrestre en diversos puntos localizados entre A y b.



Influencia del viento favorable en la propagación del sonido

En esta parte de la superficie terrestre incidirá mayor cantidad de sonido del que debería incidir, o sea, en este trecho también se oirán todos los sonidos que en tiempo de calma se desplazarían por encima de AB.»



La influencia del viento contrario en la propagación del sonido

Así pues, el hecho de que el sonido se amplifica por el viento no se debe a la variación de la velocidad de las ondas sonoras, sino al cambio de su forma (en resumidas cuentas el cambio de forma depende de la variación de la velocidad).

163. La presión del sonido.

¿Qué presión, aproximadamente, ejercen las ondas acústicas sobre el tímpano?

Si las ondas de aire tienen una presión de $5 \cdot 10^{-18} \text{ N/cm}^2$, el sonido se vuelve perceptible. Cuando el sonido es alto, la presión es cientos y miles de veces mayor. No obstante, la presión del sonido es pequeñísima.

Por ejemplo, se sabe que el ruido de una vía pública con tráfico animado ejerce sobre el tímpano una presión de $(1 \text{ ó } 2) \times 10^{-4} \text{ N/cm}^2$, es decir, de 0,00001 a 0,0005 at.

164. ¿Por qué la puerta debilita el sonido?

Consta que la madera conduce el sonido mejor que el aire: al dar golpes por un extremo de un rollo largo se pueden escuchar muy bien aplicando el oído al otro extremo.

¿Por qué, pues, no se oyen claramente las voces de las personas que están conversando en un cuarto mientras la puerta esté cerrada?

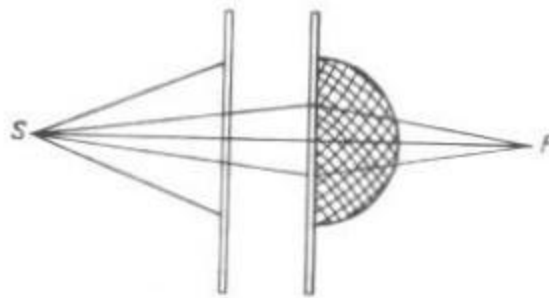
Por más extraño que parezca, la puerta amortigua el sonido precisamente porque lo conduce mejor que el aire. El haz sonoro se desvía de la perpendicular de incidencia cuando pasa del aire a la madera, es decir, cuando penetra en un medio que transmite el sonido más rápidamente. Por lo tanto, existe cierto ángulo límite de incidencia de los haces sonoros que pasan del aire a la madera, el cual es bastante pequeño (debido al elevado índice de refracción).

O sea, una parte considerable de las ondas aéreas que atraviesan el aire e inciden en la superficie de madera, deberán reflejarse al aire sin penetrar en esta última. En suma, la madera dejará pasar un porcentaje reducido de ondas sonoras procedentes del aire, que inciden en la superficie de separación de estos dos medios. Por esta razón, la puerta disminuye la intensidad del sonido.

165. La lente acústica.

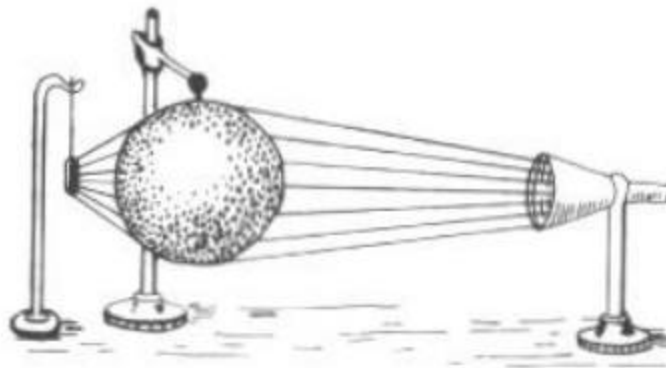
¿Existirá lente que refracte el sonido?

Es muy fácil construir una lente para refractar el sonido. Para ello se podría utilizar una semiesfera de malla de alambre llena de plumón que disminuye la velocidad del sonido. Dicho objeto podrá servir de lente convergente para el sonido.



Lente de plumón para refractar el sonido

En la figura aparece un diafragma consistente en una hoja de cartulina puesta delante de la lente, que separa los haces sonoros que se enfocan en F por esta última. En el punto S está colocada una fuente de sonido (un silbato), y en F, una llama sensible al sonido. Ofrecemos la descripción de la lente «acústica» ideada por J. Tyndall.



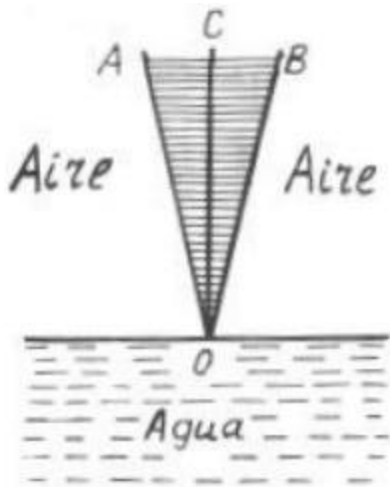
Lente de dióxido de carbono para refractar el sonido

«Mi "lente", escribe el inventor, consta de una esfera hueca hecha de una sustancia preparada a base de colodión (ver figura), que contiene un gas más denso que el aire, por ejemplo, dióxido de carbono. La pared de la esfera es tan delgada que cede fácilmente al menor empuje dirigido desde afuera y lo transmite al gas. A un lado de la lente, bastante cerca de ella, cuelgo mi reloj de bolsillo y al otro lado, a una distancia de 1,5 m aproximadamente, un embudo de vidrio, con la parte ancha dando hacia la esfera. Aplico el oído al embudo y, moviendo convenientemente la cabeza, muy pronto localizo el lugar donde el tictac se oye muy alto, éste es el "foco" de la lente. Si aparto el oído del foco, el sonido se debilita; si, en cambio, el oído permanece en el foco mientras se desplaza la esfera, el tictac también se debilita; cuando la esfera vuelve a su lugar, el reloj sigue sonando como antes. Por lo tanto, la lente permite oír claramente el tictac del reloj que no se oye "a simple oído", por decirlo así.»

166. La reflexión acústica.

¿Cuándo el sonido penetra en el agua, ¿se aproximará el «haz» acústico a la perpendicular de incidencia o se alejará de ella?

Si razonamos como en el caso del haz luminoso, sacaremos una conclusión errónea, puesto que la luz se propaga en el agua más lentamente que en el aire, en tanto que las ondas sonoras viajan en él con una velocidad cuatro veces mayor. Por ello, el haz sonoro que pasa del aire al agua, se desviará de la perpendicular de incidencia.



Refracción del sonido en el agua

Por esta misma razón, cuando el sonido pasa del aire al agua, existe un ángulo límite que en este caso sólo es de 13° (correspondientemente al valor elevado del índice de refracción, equivalente a la razón de velocidades de propagación del sonido en ambos medios). La figura muestra cuán pequeño es el "cono" AOB que incluye todos los ángulos, bajo los cuales el sonido puede penetrar en el líquido. Los haces sonoros que no pertenecen a dicho cono, se reflejarán de la superficie del agua sin atravesarla (reflexión interna total del sonido).

167. El ruido del caracol.

¿Por qué se oye un ruido leve en una taza o en un caracol aplicados al oído?

El ruido que percibimos cuando aplicamos una taza o un caracol al oído, se debe a que en este caso dicho objeto sirve de resonador que amplifica los ruidos procedentes del medio ambiente; generalmente no nos damos cuenta de ellos, puesto que son muy débiles. Este ruido mixto se asemeja al que producen las olas del mar al batir la costa, lo cual ha dado origen a muchas leyendas relacionadas con el ruido del caracol.

168. El diapasón y el resonador.

Si un diapasón vibrante se coloca sobre una caja de madera, el sonido aumentará notablemente. ¿De dónde procede en este caso la energía excesiva?

Cuando las vibraciones del diapasón se transmiten al resonador, el sonido se vuelve más alto, pero dura menos tiempo. De modo que la cantidad de energía emitida por el diapasón vibrante y el resonador, es una misma. No se obtiene ningún exceso de energía.

169. ¿Adónde se van las ondas acústicas?

¿Adónde se va la energía de las oscilaciones acústicas cuando el sonido deja de oírse?

Cuando se extingue un sonido, la energía de las ondas acústicas se convierte en la del movimiento térmico de las moléculas de las paredes y el aire. Si en el aire de las habitaciones no hubiera rozamiento interno, y las paredes fueran perfectamente elásticas, ningún sonido se extinguiría: se oiría eternamente cualquier nota. En las habitaciones de dimensiones ordinarias las ondas acústicas son rechazadas por las paredes de 200 a 300 veces, trasmitiéndoles parte de su energía cada vez que se reflejan, hasta que, al fin y al

cabo, quedan absorbidas totalmente, elevando la temperatura de las paredes. Por supuesto, la cantidad de calor que entregan a estas últimas, es infinitésima. Una persona debería estar cantando durante dos o tres días sin cesar para generar una caloría mediante este procedimiento.

170. La visibilidad de los rayos luminosos.

¿Ha visto usted alguna vez rayos luminosos?

Muchos lectores están seguros de que han visto rayos luminosos. Semejantes testigos oculares quedarán muy asombrados al enterarse de que jamás los han visto. Esto no ha podido ocurrir por la sencilla razón de que los rayos luminosos son invisibles. Cada vez que nos parece que vemos rayos de luz, lo que notamos son cuerpos iluminados por ellos. La luz que permite verlo todo, es invisible. He aquí lo que dijo sobre este tema John Herschel, hijo de un célebre astrónomo y gran astrónomo y físico él mismo:

«La luz, a pesar de que permite ver los objetos, de por sí es invisible. Hay quien dice que se puede ver un rayo luminoso cuando éste penetra en un cuarto oscuro por un orificio abierto en una pared, o cuando conos o rayos luminosos irrumpen en los espacios entre las nubes un día nublado, procedentes de una zona (invisible) del sol como del punto, en el cual convergen todas las líneas paralelas. Pero lo que vemos en este caso, no es la luz, sino innumerables partículas de polvo o niebla que reflejan cierta parte de la luz que incide en ellas.

Vemos la Luna porque la ilumina el Sol. Donde no hay Luna, no vemos nada, aunque estamos seguros de que la veremos cuando vuelva a ocupar la misma posición, y que veríamos el Sol si estuviéramos en la Luna (dondequiera que se encuentre, a menos que no esté tapada por la Tierra). Por consiguiente, en cada uno de estos puntos siempre hay luz solar, aunque es imposible verla como un objeto cualquiera. Existe, pues, en forera de proceso.

Lo que acabamos de explicar respecto al Sol, también se refiere a las estrellas; por eso, cuando contemplamos el cielo nocturno no vemos sino un fondo oscuro, excepto las direcciones en que vemos estrellas, aunque estamos seguros de que todo el espacio (fuera de la sombra de la Tierra) es atravesado constantemente por haces luminosos...»

Esta afirmación parece refutar el hecho de que percibimos claramente rayos de luz procedentes de las estrellas y, en general, de todo punto luminoso; además, cuando entornamos los ojos distinguimos un haz luminoso que llega hasta nosotros desde un astro lejano. Tanto lo uno como lo otro es una equivocación. Lo que entendemos por rayos procedentes de las estrellas, es un efecto que surge como resultado de la disposición radial de las fibras que componen el cristalino del ojo humano. Si seguimos un consejo de Leonardo de Vinci y miramos las estrellas a través de un orificio muy pequeño practicado mediante una aguja en una hoja de cartulina, no veremos ningún rayo ni estrella; los astros nos parecerán partículas de polvo muy brillantes, puesto que en este caso un haz luminoso muy fino penetra en el ojo a través de la parte central del cristalino, de modo que la estructura radial de éste no lo puede deformar. Por lo que atañe al haz de luz que vemos al entornar los ojos, éste se forma a consecuencia de la difracción de la luz en las pestañas.

171. El orto del Sol.

La luz tarda poco más de ocho minutos en recorrer la distancia del Sol a la Tierra. ¿Cómo está relacionado este hecho con el instante de salida de este astro?

El hecho de que el haz luminoso tarda 8 minutos en salvar la distancia del Sol a la Tierra, no nos permite concluir que si lo hiciera instantáneamente, veríamos la salida del Sol 8 minutos antes. Los rayos de luz que penetran en el ojo cuando contemplamos el sol naciente, fueron

emitidos hace 8 minutos, de manera que no tenemos que esperar ese lapso para que alcancen el lugar donde nos encontramos. Por eso, si la luz se propagara instantáneamente, veríamos la salida del sol en el mismo instante que ahora, y no 8 minutos antes.

172. La sombra del alambre.

¿Por qué en un día soleado la sombra de un farol suspendido de un alambre se proyecta claramente en el pavimento, mientras que la del alambre casi no se ve?

La longitud de la sombra proyectada por el alambre iluminado por el sol depende de la posición del punto de intersección de sus tangentes comunes, trazadas al limbo solar y a la circunferencia que acota la sección del alambre. La figura muestra que el ángulo A de intersección de las tangentes es igual al ángulo bajo el cual el observador terrestre ve el limbo solar, o sea, es de $0,5^\circ$.

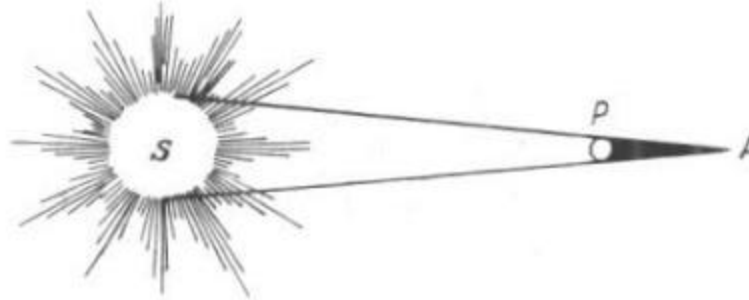


¿Por qué el alambre no proyecta sombra?

Este dato nos permite determinar la longitud de la sombra proyectada por el alambre: ésta es igual a su diámetro multiplicado por $2 \cdot 57$, pues es sabido que un objeto que se ve bajo un ángulo de 1° se encuentra a una distancia equivalente a 57 veces su diámetro. Si el alambre que sostiene el farol, mide 0,5 cm de grosor, la longitud de la sombra será de

$$0,5 \cdot 114 = 57 \text{ cm};$$

o sea, esta magnitud es mucho menor que la altura a la que se encuentra suspendido el farol. Por ello, la sombra (sin contar la penumbra) del alambre no llega hasta el pavimento.



¿Por qué es tan corta la sombra PA proyectada por el alambre?

La sombra del farol (en el espacio) es mucho más larga, correspondientemente a su diámetro más grande. Si la sección de este último es de 30 cm, la longitud de la sombra proyectada en el espacio será igual a

$$0,3 \cdot 114 = 34 \text{ m.}$$

Es decir, siempre alcanzará la tierra, puesto que se suelen colocar los faroles a una altura de 5 a 10 m.

173. La sombra de una nube.

¿Qué es lo que tiene mayores dimensiones, una nube o su sombra completa?

La nube, lo mismo que el farol del ejercicio precedente, proyecta una sombra en forma de cono que se estrecha (y no se ensancha, como se cree a veces) hacia la tierra. Este cono es bastante grande, pues las dimensiones de la nube son considerables. Si ésta mide tan sólo 100 m de diámetro, proyectará una sombra de más de 11 km. de longitud. Sería interesante calcular en qué magnitud disminuye la sombra proyectada sobre la tierra en comparación con las dimensiones reales de la nube.



¿Qué es lo que tiene mayores dimensiones, una nube o su sombra completa?

He aquí un ejemplo: una nube flota a una altitud de 1000 m, mientras que los rayos solares inciden sobre la superficie terrestre bajo un ángulo de 45° ; la longitud de la parte del cono

comprendida entre la nube y el suelo es de $1000 \cdot \sqrt{2} \approx 1400$ m. En semejante caso, la distancia entre las semirrectas que forman un ángulo de $0,5^\circ$, será de $1400/115$, es decir, de unos 12 m. Si la nube mide menos de 12 m de diámetro, su sombra completa no alcanzará la superficie de la tierra. En las condiciones dadas y cuando la nube es de grandes dimensiones, ésta proyectará sombra completa sobre la tierra, 12 m. más corta que el diámetro correspondiente de la nube.

Si las nubes son de dimensiones considerables, semejante diferencia no tiene mucha importancia, de modo que las sombras perfiladas en el suelo no se distinguirán mucho de sus «prototipos». Por consiguiente, podemos considerar que sus dimensiones son iguales, aunque comúnmente se piensa que la sombra es más grande que la nube que la proyecta. Este hecho permite estimar fácilmente las dimensiones longitudinales y transversales de las nubes.

174. Lectura a la luz de la luna.

¿Será posible leer un libro a la luz de la luna llena?

Subjetivamente, la luz de la luna se percibe como una luz bastante intensa, por lo cual generalmente se suele contestar afirmativamente a esta pregunta. Pero los lectores que han tratado de leer un libro a la luz de la luna llena, se habrán dado cuenta de que cuesta mucho trabajo distinguir los caracteres. Para leer un libro impreso con caracteres corrientes, se necesita una iluminación no menor de 40 lx, mientras que si los caracteres son menudos (gallarda), no menos de 80 lx. A propósito, cuando el cielo está despejado, la luna llena sólo asegura una iluminación de una décima de lux. (La luna llena produce la misma iluminación que una vela encendida a 3 m de distancia.) Queda claro, pues, que la luz del satélite natural, no es suficiente para leer un libro sin hacer algún esfuerzo.

También estamos propensos a sobrestimar la iluminación natural en las noches blancas. En esta época, a la medianoche, la iluminación en la latitud de San Petersburgo es de 0,5 lx aproximadamente. Por tanto, durante las noches blancas se puede escribir o leer sin más luz que la natural sólo a las 10 de la «noche» o a las 2 de la madrugada, cuando la iluminación es de 30 a 40 lx.

176. Una estrella y una vela.

¿Qué es lo que alumbra más, una estrella de primera magnitud o una vela encendida alejada a 500 m?

La intensidad luminosa de una vela ordinaria supera cientos de miles de veces la de una estrella: una vela encendida y alejada de nosotros a 500 m produce la misma iluminación que una estrella de primera magnitud. Por ende, con arreglo a las condiciones indicadas al formular el problema, las dos fuentes de luz iluminan de manera igual (a saber, cada una genera 0,000004 lx).

177. El color de la superficie lunar.

La Luna observada desde la Tierra a simple vista tiene color blanco y observada en un telescopio parece tener color de yeso. No obstante, los astrónomos afirman que su superficie es de color gris oscuro.

¿De qué forma conciliamos estos criterios?

La Luna sólo rechaza una catorceava parte de la luz recibida. Por lo tanto, los astrónomos dicen con toda razón que la superficie de nuestro satélite natural es gris. En una de sus

conferencias sobre la luz J. Tyndall explica por qué la Luna vista desde la Tierra parece ser de color blanco:

«La luz que un cuerpo recibe, se divide en dos partes, una de las cuales es rechazada por su superficie. Esta luz reflejada conserva el color que tenían originariamente los rayos incidentes. Si la luz incidente era blanca, la reflejada también lo será. Por ejemplo, la luz solar, aunque la rechace un cuerpo negro, seguirá siendo blanca. Las diminutas partículas del humo más negro que sale de una chimenea y se ilumina con un haz de luz del sol, reflejarán esta luz blanca... De modo que si la Luna estuviera tapizada del terciopelo más negro, no por ello dejaría de presentarnos su disco plateado.»

Por supuesto, el contraste con el cielo oscuro, sobre el cual parecen más brillantes las fuentes luminosas más débiles, no puede menos que realzar la intensidad de la luz de la Luna.

178. ¿Por qué la nieve es blanca?

¿Por qué la nieve es blanca aunque la forman diminutos cristales transparentes?

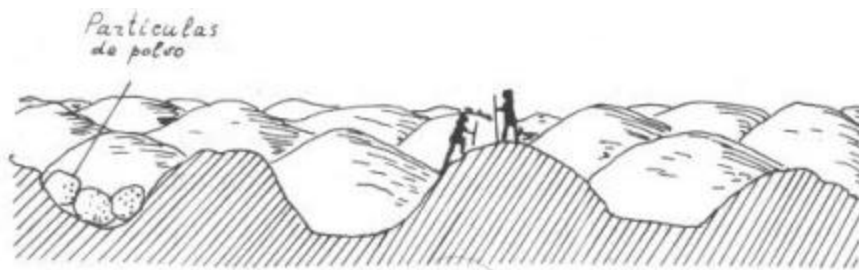
La nieve es de color blanco por la misma razón, por la cual parece ser blanco el vidrio triturado y, en general, todas las sustancias transparentes trituradas. Si desmenuzamos un trozo de hielo en un mortero o lo raspamos con un cuchillo, obtendremos polvo de color blanco. Este color se debe a que los rayos luminosos que penetran en los diminutos trocitos de hielo transparente, no emergen de ellos, sino que se reflejan en su interior por la superficie de separación del hielo y el aire (reflexión interna total). A su vez, la superficie del trozo de hielo, que refleja desordenadamente en todos los sentidos los rayos de luz recibidos, nos parece tener color blanco.

De modo que la causa que condiciona el color blanco de la nieve, es su fraccionamiento. Si los espacios que hay entre las partículas de nieve se llenan de agua, ésta pierde su color blanco y se vuelve transparente.

179. Sacando lustre al calzado.

¿Por qué tienen brillo los zapatos lustrados?

Por lo visto, ni el betún negro ni el cepillo tienen algo que pueda dar brillo al calzado. Por esto, este fenómeno es para muchas personas una especie de enigma.



A una persona disminuida 10.000.000 de veces, una placa bien pulida le parecerá un terreno poblado de colinas

Para descubrir el secreto hay que comprender en qué se diferencia una superficie brillante de otra mate. Se suele creer que la superficie pulida es lisa, mientras que la mate es rugosa. Esto no es cierto: ambas superficies son rugosas. No existen superficies perfectamente lisas. Una pulimentada vista en un microscopio parece cortada a pico, lo mismo que el filo de una navaja vista en un microscopio; a una persona disminuida diez millones de veces, la superficie de una placa esmeradamente pulida le parecería un terreno poblado de colinas .

Cualquier superficie, sea mate o esté muy bien pulida, es rugosa, tiene abolladuras y raspaduras. Todo depende de las dimensiones de estas irregularidades y defectos. Si son menores que la longitud de onda de la luz que cae sobre ellos, los rayos serán reflejados de forma «regular», es decir, conservando todos los ángulos de inclinación de unos respecto a otros que tenían antes de ser rechazados por la superficie. Semejante superficie produce imágenes especulares, brilla y se dice que está pulida. Pero si, en cambio, dichas irregularidades miden más de la longitud de onda de la luz incidente, los rayos luminosos serán reflejados de forma desordenada, sin conservar los ángulos iniciales de inclinación de unos respecto a otros. Semejante luz difusa no da reflejos especulares y se dice que es mate.

De aquí se deduce que una superficie puede estar pulida para unos rayos y ser mate para otros. Para los rayos de luz visible, cuya longitud de onda es de 0,5 micras (0,0005 mm) por término medio, una superficie con irregularidades menores que las que acabamos de indicar, será pulida; para los rayos infrarrojos, de onda más larga, también lo será; pero para los ultravioletas, de onda más corta, será mate.

Mas, volvamos al prosaico tema de nuestro problema: ¿por qué tiene brillo el calzado lustrado? Si la superficie de cuero no está embetunada, presenta todo tipo de irregularidades, de dimensiones considerablemente mayores que la longitud de onda de la luz visible, por consiguiente, es mate. Una capa delgada de betún viscoso, aplicada a tal superficie rugosa, camufla las irregularidades y alisa las fibras finas que hay en ella. Pasando muchas veces el cepillo, se quita el exceso de betún en los salientes y se llenan los entrantes, por lo cual las irregularidades se disminuyen y sus dimensiones se vuelven menores que la longitud de onda de los rayos visibles: a ojos vistos la superficie deja de ser mate y se torna brillante.

180. El número de colores del espectro y del arco iris.

¿Cuántos colores tienen el espectro solar y el arco iris?

Generalmente se dice y repite que el espectro solar y el iris tienen siete colores. Este es uno de los equívocos más frecuentes, y a nadie se le ha ocurrido refutarlo. Si examinamos la banda de colores del espectro sin atenernos a esta idea preconcebida, sólo distinguiremos los cinco colores fundamentales que siguen: rojo, amarillo, verde, azul y violeta.

Estos colores no tienen límites acusados, la transición de uno a otro es gradual. De modo que además de los colores fundamentales enumerados se distinguen los siguientes matices intermedios: anaranjado, verde amarillo, verde azulado y añil.

O sea, el espectro solar tendrá cinco colores si sólo tenemos en cuenta los fundamentales, o nueve si también consideramos los matices intermedios.

Pero, ¿por qué se acostumbra nombrar siete colores?

Inicialmente, I. Newton sólo distinguió cinco colores. Describiendo su famoso experimento (en su obra *Optics*) dice lo siguiente: «El espectro está coloreado de modo que su parte menos refractada es roja; la parte superior, más refractada, tiene color violeta. En el espacio comprendido entre estos colores extremos se distinguen los colores amarillo, verde y azul claro.»

Posteriormente, tratando de armonizar el número de colores del espectro y el de los tonos fundamentales de la gama musical, Newton añadió dos colores más a los cinco enumerados. Esta afición al número siete, que no está motivada de ninguna manera, no es sino una reminiscencia de las creencias astrológicas y del tratado de la «música de las esferas» de los antiguos.

Por lo que se refiere al arco iris, ni siquiera podemos tratar de distinguir los siete colores: nunca se llega a distinguir cinco matices. Generalmente, en el arco iris sólo se ven tres colores, a saber, el rojo, el verde y el violeta; a veces apenas se aprecia el amarillo; en otros casos el iris ostenta una franja blanca bastante ancha.

No podemos menos que asombrarnos de cuán arraigada está en la mente humana la leyenda de los «siete» colores del espectro, a pesar de que en nuestra época la física se enseña por métodos experimentales. A propósito, este prejuicio aun subsiste en algunos libros de texto de escuela, mientras que ya está desterrado de los cursos universitarios. Estrictamente hablando, aun los cinco colores fundamentales del espectro, a los cuales nos hemos referido, son convencionales hasta cierto grado. Podemos dar por sentado que la banda espectral sólo está dividida en tres zonas principales, a saber:

la zona roja,
la zona verde amarilla y
la zona añil.

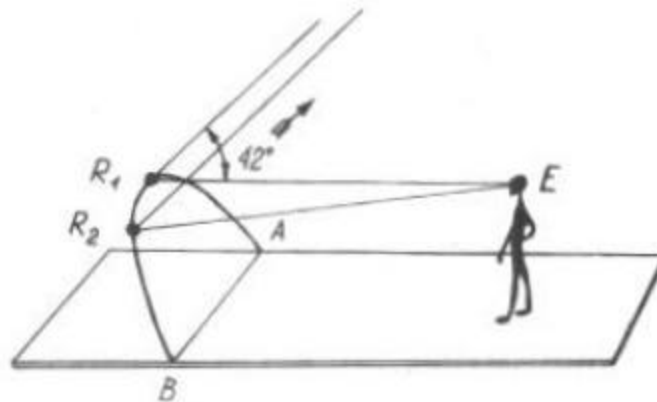
Si tenemos en cuenta cada uno de los matices distinguibles, según muestran los experimentos, será posible clasificar más de 150 matices.

181. El arco iris.

Hay quien afirma que ha visto un arco iris un 22 de junio al mediodía en Moscú.

¿Será posible tal cosa?

El arco iris sólo se puede ver cuando el sol se encuentra formando un ángulo de 42° sobre el horizonte (ver figura).



Para que sea posible observar el arco iris, el sol debe ascender a una altitud determinada respecto al horizonte

En la latitud de Moscú, el día del solsticio de verano la altitud del sol meridional (el 22 de junio) es de

$$90^\circ - 56^\circ + 23,5^\circ = 57,5^\circ.$$

Por consiguiente, aquel día el sol estuvo más alto de lo necesario para que fuera posible ver el arco iris.

182. A través de vidrios de colores.

¿Qué color parecen tener las flores rojas cuando se miran a través de un vidrio verde? Y las azules, ¿qué color tienen?

El vidrio verde sólo deja pasar los rayos verdes y detiene todos los demás: las flores rojas sólo emiten rayos rojos y casi no emiten rayos de otro color. Mirando una flor roja a través de un trozo de vidrio verde, no percibimos de sus pétalos ningún rayo, pues los únicos rayos que emiten, son detenidos por el referido vidrio. Por ello, una flor roja vista a través de semejante vidrio parecerá negra.

También parecerá tener color negro una flor azul vista a través del vidrio verde.

He aquí lo que dice en su libro *La física enseñada en las excursiones estivales* el Prof. M. Piotrovski, físico, artista y observador muy sagaz de la naturaleza:

«Si observamos un macizo de flores a través de un trozo de vidrio rojo, advertiremos que las flores rojas, por ejemplo, el geranio, son tan intensas como las flores blancas; sus hojas verdes nos parecerán absolutamente negras, con un brillo metálico; las flores azules (el acónito, por ejemplo) se verán tan negras que apenas se distinguirán sobre el fondo negro de las hojas; las flores de color amarillo, rosa y violeta nos parecerán más o menos opacas.»

«Si miramos las mismas flores a través de un vidrio verde, nos impresionará el verdor brillante de sus hojas, cuyo fondo realza la intensidad de las flores blancas; algo más pálidas se verán las amarillas y las celestes; las rojas se convertirán en muy negras; las de color lila y rosa pálido se verán opacas y hasta grises, de modo que los pétalos de color rosa claro del escaramujo resultarán más oscuros que sus hojas.»

«Las flores rojas vistas a través de un vidrio azul también "se volverán" negras; las blancas "se tornarán" claras; las amarillas, totalmente negras; las celestes, casi tan claras como las blancas.

Es obvio que las flores rojas nos envían mucho más rayos rojos que todas las demás; las amarillas despiden cantidades aproximadamente iguales de rayos rojos y verdes, pero muy pocos azules; las de color rosa y púrpura, muchos rayos azules y rojos, pero poco verdes, etc.»

183. El oro cambia de color.

¿En qué condiciones el oro tiene color plateado?

Para que el oro pierda su característico color amarillo, hay que exponerlo a una luz exenta de rayos amarillos. Para crear este efecto, Newton retenía el color amarillo del espectro dejando pasar los demás colores y uniéndolos a continuación mediante una lente convergente. «Si los rayos amarillos se retienen antes de que atraviesen la lente, apuntó el sabio posteriormente, el oro (iluminado por los demás rayos) parecerá tan blanco como la plata.»

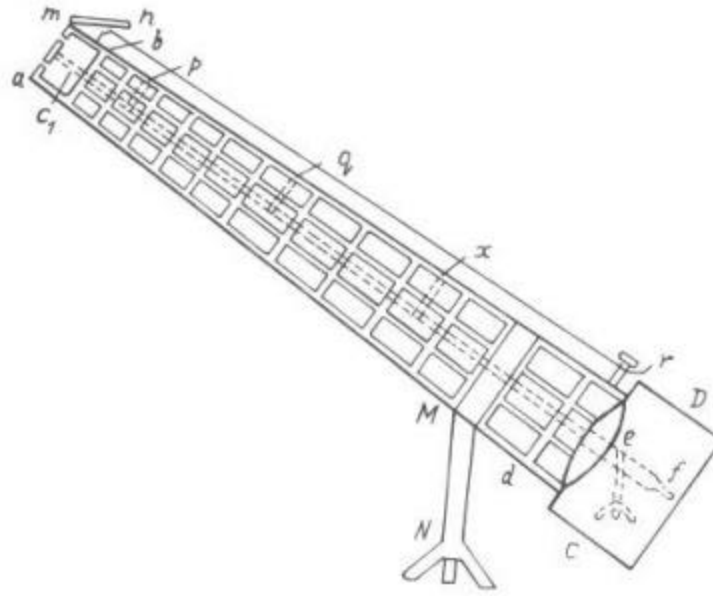
184. El percal visto a la luz eléctrica.

¿Por qué el percal que tiene color lila a la luz diurna, parece ser negro a la luz eléctrica?

La luz de la bombilla eléctrica tiene muchos menos rayos azules y verdes que la del sol. De modo que el percal lila, iluminado por la luz de la bombilla eléctrica casi no refleja rayos; los únicos rayos que podría reflejar, no los recibe. Si el ojo humano no recibe rayos luminosos de una superficie, ésta le parece negra.

186. El eclipse artificial del Sol.

Un inventor patentó su dispositivo consistente en un tubo que permite ver las estrellas y otros objetos dispuestos cerca del borde del disco solar, sin esperar un eclipse total del astro.



Dispositivo destinado a imitar el eclipse solar total

He aquí la descripción del invento:

«El artefacto consta de un tubo de 35 a 50 m de longitud compuesto de varillas de aluminio (para disminuir su peso) sujetadas unas a otras de modo que forman marcos rectangulares no muy grandes, según muestra la figura. En dichos marcos se colocan cristales pintados de negro por el lado interior, absolutamente impenetrables para la luz.

En el extremo superior del tubo está fijado un disco metálico que sustituye la Luna. Éste debe tapar el Sol como en un eclipse total. El disco se desplaza por una varilla que mide lo mismo que el tubo; dicha varilla también se desplaza en sentido vertical, regulando la posición del disco. La varilla está sujeta en tres puntos (p, q y x) a la armazón del tubo para evitar las desviaciones y la vibración.

Después de terminar las observaciones, la boca superior del tubo se tapa con el disco de aluminio mn (para proteger el interior de las precipitaciones) mediante un resorte y un alambre. El tubo puede girar como un telescopio permitiendo efectuar las observaciones sin que importe la posición del Sol en el cielo. El aparato está fijado sobre el soporte MN.

El telescopio ef, destinado a efectuar las observaciones, se encuentra dentro de la cámara oscura CD. Es sabido que desde el fondo de un pozo profundo se pueden ver las estrellas en el cielo de día y a la luz del sol; desde la superficie terrestre las estrellas sólo se ven después de la puesta del sol. Este fenómeno se observa porque en el pozo no entran rayos luminosos procedentes de la atmósfera iluminada por el astro, que de día no dejan ver las estrellas desde la superficie terrestre.»

«El mismo efecto se produce en el tubo descrito, en cuyo interior no entra luz y en cuya cámara oscura CD no entran rayos luminosos reflejados por la atmósfera iluminada. En el otro extremo del artefacto está colocado un disco que tapa el Sol. Precisamente en el espacio entre el disco y el borde del tubo se observan los fenómenos que tienen lugar junto a la llamada posición visible del astro.»

¿Qué opina usted sobre este invento?

La idea de este invento está basada en un equívoco ingenuo de que es suficiente tapar el limbo solar con un círculo no transparente para crear la situación de eclipse solar. Otro error del inventor consiste en la seguridad de que desde el fondo de un pozo profundo es posible ver estrellas a la luz del sol. Ambos supuestos son teóricamente erróneos y no se corroboran experimentalmente.

¿Por qué, en condiciones normales, no distinguimos ni las estrellas ni los rayos de la corona solar junto al borde de este astro? No sólo porque nos deslumbra la luz brillante del sol, sino porque la atmósfera dispersa los rayos luminosos que inciden en ella, a consecuencia de lo cual la luz tenue procedente de la corona y las estrellas se pierde en la dispersa. Si no hubiera atmósfera, sobre el firmamento negro a la luz del sol divisaríamos tanto las estrellas como la corona solar. Cada partícula que se encuentra en suspenso en la atmósfera terrestre iluminada por el sol viene a ser un lucero que emite una luz más intensa que las estrellas verdaderas, de modo que la que nos llega de los luceros es incapaz de penetrar a través de esa cortina brillante y continua. Ésta es la causa por la cual de día no vemos las estrellas. Para un observador que se encuentra en el fondo de un pozo profundo, las condiciones son las mismas: entre su ojo y las estrellas media la misma capa de la atmósfera que las hace indistinguibles: los rayos luminosos procedentes de los astros se confunden con haces más intensos dispersados por las partículas de aire. Es muy extraño, pues, que haya surgido esta leyenda tan poética de que desde el fondo de los pozos profundos y a través de las chimeneas de fábricas se ven estrellas. Ninguna de las publicaciones contiene pruebas directas de que esto sea factible: todos los autores que habían escrito sobre esto Aristóteles hasta John Herschel, hacen referencia a otras personas. Cuando Humboldt trató de averiguar entre los deshollinadores berlineses si alguno de ellos de día había visto estrellas desde el interior de las chimeneas de una fábrica, nadie le respondió afirmativamente. Ahora volvamos a examinar el eclipse solar artificial. Tapando el sol con un círculo y permaneciendo en el fondo del enorme océano de aire, protegemos el ojo de los rayos solares directos; no obstante, el cielo que se ve encima de dicho círculo sigue lleno de luz, y las partículas de aire continúan dispersándola y acortando el paso» a la procedente de las estrellas y la corona solar. El caso se torna distinto si una pantalla protectora se coloca fuera de la parte densa de la atmósfera, como sucede cuando la luna tapa el sol: en este caso la pantalla intercepta los rayos solares antes de que alcancen la atmósfera terrestre. De modo que los rayos luminosos no se dispersan en la zona sombreada de la atmósfera; no obstante, en dicha zona penetran rayos dispersados por las zonas más claras cercanas a la sombra, llegando algunos de ellos hasta el observador. Por ello, ni siquiera en los momentos de eclipse solar total, el firmamento es tan negro como a la medianoche. Así pues, la inconsistencia de la idea de este invento está a la vista.

187. La luz roja.

¿Por qué en los ferrocarriles se utiliza la luz roja como señal de alto?

Los rayos rojos, como rayos de mayor longitud de onda, son menos dispersados por las partículas suspendidas en el aire que los de otros colores. Por eso, su alcance es mayor que el de estos últimos. A su vez, en el transporte, la visibilidad de la señal es la característica más importante: para detener el tren, el maquinista debe empezar a frenarlo a una distancia considerable del obstáculo.

Para obtener imágenes de los planetas (especialmente, de Marte) los astrónomos se valen del filtro infrarrojo, pues la atmósfera es más transparente para los rayos rojos que para los de otros colores. Los detalles que no se distinguen en una imagen ordinaria, se revelan más nítidamente en una foto sacada a través de una placa de vidrio que sólo deja pasar rayos infrarrojos; en este último caso se logra obtener imágenes de la superficie del planeta, mientras que en las fotografías ordinarias sólo aparece su atmósfera.

Además, se prefiere utilizar la luz roja como señal de alto porque el ojo humano es más sensible a este color que al azul o al verde.

188. La refracción y la densidad.

¿Qué dependencia hay entre el índice de refracción y la densidad del medio?

Muy a menudo se suele afirmar que el índice de refracción de una sustancia es tanto mayor como mayor es su densidad. Se asevera que « al pasar un rayo de un medio menos denso a otro, más denso, su recorrido se aproxima a la perpendicular de incidencia». Este fenómeno tiene lugar frecuentemente, pero no siempre, ni mucho menos.

Es cierto que la razón de los índices de refracción de dos medios es inversamente proporcional a la de las velocidades de la luz en éstos. Por lo tanto, el problema que nos interesa puede ser planteado de otra manera, más idónea para el análisis:

¿Será cierto que la velocidad de la luz es tanto menor cuanto más denso es el medio donde se propaga?

Si comparamos los tres medios más importantes, el vacío, el aire y el agua, nos daremos cuenta de que semejante dependencia no existe. Si adoptamos por unidad la densidad del aire, la de los tres medios se expresará con los datos siguientes:

| | |
|-------|-----|
| Vacío | 0 |
| Aire | 1 |
| Agua | 770 |

Si adoptamos la velocidad de la luz en el aire como unidad, las respectivas velocidades de la luz serán las siguientes:

| | |
|-------------|------|
| En el vacío | 1 |
| En el aire | 1 |
| En el agua | 0.75 |

Como vemos, no se advierte la dependencia que se esperaba. Más aún, existen sustancias de una misma densidad, en las cuales la luz se propaga con velocidad diferente (es decir, los índices de refracción de estas sustancias son distintos). Así son el cloroformo y la caparrosa blanca diluidos convenientemente. También existen sustancias de índice de refracción igual, pero de densidad diferente: el vidrio es dos veces más denso que el aceite de cedro, no obstante la velocidad de la luz en ellos es igual (es imposible ver una varilla de vidrio colocada en el seno del aceite de cedro).

La proporcionalidad inversa entre el índice de refracción y la densidad tiene lugar en un solo caso, a saber, cuando se trata de un mismo medio, pero a diferente temperatura o presión. En los demás casos esta regla no sirve.

189. Dos lentes.

He aquí una de las preguntas del certamen de Edison:

« El índice de refracción de una lente biconvexa es 1,5, y el de otra, 1,7. Ambas lentes son geométricamente idénticas. ¿Habrá alguna diferencia óptica entre ellas? ¿Qué cambios sufre un haz luminoso al pasar por cada una de estas lentes si están sumergidas en un líquido transparente cuyo índice de refracción es 1,6? »

Las lentes de forma y dimensiones iguales, pero de índice de refracción diferente (1,5 y 1,7) tienen diferentes distancias focales principales; la lente del índice mayor tiene más corta la distancia focal (en el caso dado, en el 28%).

Si ambas lentes se encuentran en el seno de un líquido cuyo índice de refracción es 1,6, influirán de diferente manera en el comportamiento de los rayos luminosos: la de índice de refracción 1,5, o sea, menor que el del líquido, actuará como una lente poco divergente, y la de índice mayor, como una poco convergente.

190. La Luna junto al horizonte.

Cuando la Luna se encuentra junto al horizonte, parece tener dimensiones más grandes que estando próxima al cenit. ¿Por qué, pues, en su disco aumentado es imposible distinguir nuevos detalles?



¿En qué caso es mejor estudiar la superficie de la Luna, cuando está lejos o cerca del horizonte?

Se distinguirán nuevos detalles siempre que el objeto se observe bajo un ángulo visual mayor. Por eso, si observáramos la luna cerca del horizonte bajo un ángulo de visión mayor que cerca del cenit, descubriríamos nuevos detalles en su disco. Mas, cuando está cerca del horizonte, sus dimensiones angulares no superan, ni mucho menos, las que tiene estando junto al cenit, ya que este satélite natural no se acerca hacia el observador cuando lo contempla próximo al horizonte; al contrario, es fácil comprender que en este caso se encuentra aún más lejos del observador que cuando está en lo alto del firmamento. Aunque no hay necesidad de exponer las causas del aumento aparente de los astros junto al horizonte, no estará de más indicar que dicho efecto no tiene nada que ver con la refracción atmosférica, a la cual se atribuye frecuentemente.

En realidad, la refracción, lejos de aumentar el diámetro vertical del lucero junto al horizonte, lo disminuye, dando forma elíptica a los limbos solar y lunar.

Aún no se ha logrado determinar definitivamente la causa verdadera del aumento del diámetro de los luceros junto al horizonte; pero sea cual fuere, este fenómeno no tiene nada que ver con la refracción atmosférica.

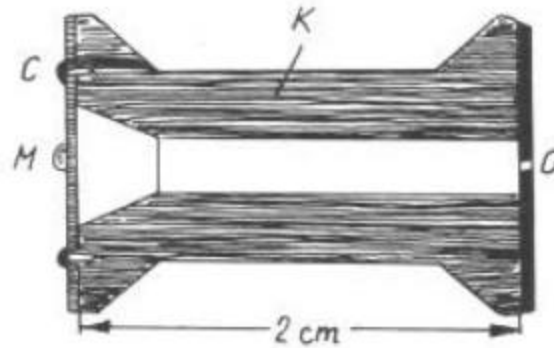
Volviendo a nuestro problema, hemos de subrayar que el aumento virtual del tamaño de los astros junto al horizonte es consecuencia de un efecto muy distinto del que tiene lugar cuando se mira a través de un telescopio o un microscopio. Los instrumentos ópticos cambian el sentido de los rayos que entran en el ojo humano, de modo que aumenta su imagen en la retina. En esto reside la esencia del efecto que crean los instrumentos ópticos que no agrandan los objetos ni los aproximan hacia el observador (éstas sólo son expresiones figuradas), sino que aumentan las imágenes de los objetos proyectadas sobre la retina, por lo cual cada una cubre un mayor número de terminaciones nerviosas. Si no se utiliza ningún instrumento, ciertos elementos del objeto se proyectan sobre una misma terminación nerviosa y, por ello, se confunden en un punto; en cambio, cuando se mira a

través del artificio correspondiente, se proyectan sobre diferentes terminaciones y se perciben como entes distintos.

Nada similar se observa cuando aumenta aparentemente el tamaño de los astros cerca del horizonte; la Luna no se proyecta aumentada sobre la retina, por lo cual es imposible divisar nuevos detalles en su disco.

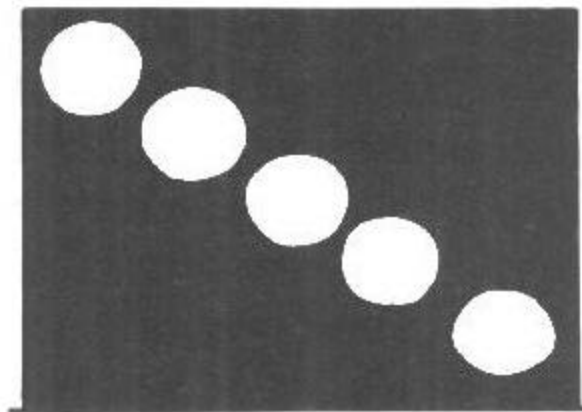
191. La luna vista a través de un orificio punzado en una hoja de cartulina.

¿Por qué una hoja de cartulina con un orificio practicado en su centro puede utilizarse como una lupa?



La Luna vista en un carrito de madera. El objeto se pega a un círculo de celuloide transparente C y se examina a través de un diminuto orificio O, practicado en el círculo de cartulina P. El interior del carrito está pintado de negro.

Si examinamos un objeto pequeño a través de un diminuto orificio abierto en una hoja de cartulina, sus dimensiones nos parecerán notablemente aumentadas; este aumento no es aparente (como el del limbo solar próximo al horizonte), puesto que semejante dispositivo permite descubrir nuevos detalles en el objeto. No obstante, la función que en este caso cumple el referido orificio, se diferencia de la de una lupa.



Compresión virtual del disco solar junto al horizonte por efecto de la refracción atmosférica

La lente cambia el sentido de los rayos luminosos de modo que en la retina del ojo se proyecta la imagen aumentada del objeto que se examina. El orificio diminuto también la aumenta, pero no cambiando el sentido de los rayos, sino reteniendo aquellos que desdibujan la imagen sobre la retina. De manera que dicho orificio permite acercar

considerablemente el objeto hacia la pupila sin afectar la nitidez de la imagen; en otras palabras, hace las veces de diafragma.

Pero semejante orificio no es totalmente idéntico a la lente en todos los sentidos: ésta utiliza más luz y proporciona imágenes mucho más brillantes que un orificio.

La «lupa» representada en la figura consta del carrete de madera K (su interior está pintado de negro). El objeto está pegado al círculo de celuloide transparente C en el punto M y se examina desde una distancia de 2 cm mediante un orificio muy pequeño O punzado en el círculo de cartulina P. Para que la imagen sea nítida, la distancia del ojo normal hasta el objeto debe ser de 25 cm, por ello, este último se verá bajo un ángulo 12,5 veces mayor que cuando la lupa no se utiliza. En otras palabras, se obtiene un aumento lineal de 12,5 veces. No obstante, este aumento sólo es eficiente si el objeto esta muy bien iluminado.

192. La constante solar.

Por constante solar se entiende la cantidad de energía térmica recibida cada minuto en el límite superior de la atmósfera por una superficie plana de 1 cm² de área, dispuesta perpendicularmente a los rayos solares.

¿Dónde y cuándo es más elevada esta magnitud, en un trópico en invierno o dentro de un círculo polar en verano?

La constante solar vale lo mismo (1,9 kcal por minuto) en todas las latitudes del globo terráqueo y en todas las estaciones del año. Durante todo el año el sol envía una cantidad igual de energía a cada centímetro cuadrado de superficie que esté dispuesta perpendicularmente a los rayos fuera de la atmósfera terrestre. Las diferencias del clima y de unas estaciones del año respecto a otras sólo se deben a que durante las diversas estaciones distintas zonas de la superficie terrestre y de una misma zona de ésta están inclinadas bajo diferentes ángulos con respecto a los rayos solares.

En 1a Tierra, cada centímetro cuadrado de una superficie perpendicular a los rayos solares, dondequiera que se encuentre, siempre recibirá una misma cantidad de calorías, tanto en invierno como en verano, lo mismo en el polo que en el ecuador. Pero en las zonas polares la superficie no forma ángulo de 90° respecto a los rayos solares; en el ecuador algunas zonas sólo lo forman dos días al año, mientras que el resto del año la superficie de la zona ecuatorial forma con ellos un ángulo muy próximo al recto, a diferencia de las regiones polares, donde es mucho más agudo.

193. El objeto más negro.

Cite el objeto más negro.

Se dice que una superficie es negra si está iluminada y no envía al ojo rayos luminosos.

Estrictamente hablando, en la naturaleza no existen semejantes objetos: los llamados colores negros (el negro de humo, el negro de platino, etc.) rechazan cierta parte de la luz que los ilumina.

Así pues, ¿cuál de los objetos es el más negro?

La respuesta es bastante inesperada: el objeto más negro es un agujero negro.

Por cierto, no se tiene en cuenta un agujero cualquiera, sino uno bajo ciertas condiciones.

Por ejemplo, lo sería un orificio perforado en la pared de una caja cerrada, cuyo interior esté pintado de negro.

Coja una caja, píntela del color más negro por dentro y por fuera y abra en su pared un agujero pequeño: éste siempre le parecerá más negro que la pared de la caja. La causa de este efecto es la siguiente: una parte del haz de rayos luminosos que entran en la caja a través de dicho orificio, es absorbida por las paredes negras, en tanto que la otra es reflejada; esta última no sale de la caja por el agujero, sino que incide repetidamente sobre

la superficie interior negra, volviendo a ser absorbida y reflejada parcialmente, etc. Antes de que el resto de rayos salga por el orificio, dentro de la caja la luz es absorbida y rechazada tantas veces que se debilita hasta no poder herir nuestro ojo.

Si este fenómeno se ilustra con datos numéricos, se entiende mejor en qué progresión disminuye la intensidad del haz luminoso mientras es reflejado muchísimas veces. Para simplificar, supongamos que el color negro de las paredes interiores de la caja absorbe el 90 % de la luz que recibe, dispersando el 10 % restante. Entonces, el haz reflejado una vez sólo tendrá 0,1 parte de la energía inicial; el reflejado dos veces, $0,1 \cdot 0,1$, es decir, 0,01; el reflejado tres veces, $0,1 \cdot 0,01$, es decir, 0,001, etc.

Por ejemplo, es fácil calcular la intensidad de un rayo reflejado por vigésima vez: será $1 \cdot 10^{-20}$ veces menor que la inicial, a saber, constituirá su

0,00000000000000000001 parte.

Prácticamente, esta cifra equivale a la ausencia de luz, pues el ojo humano es incapaz de percibir una luz de intensidad tan insignificante. Si el haz inicial procedente del sol generaba una iluminación de 100.000 lx, después de la vigésima reflexión la iluminación será de sólo

0,00000000000000000001 lx.

Se sabe que la iluminación creada por una estrella de sexta magnitud (de la estrella menos brillante que se distingue a simple vista) vale 0,00000004 lx. Por consiguiente, los rayos que salen por el orificio después de reflejados por vigésima vez son incapaces de producir algún efecto en la vista humana.

Ahora está claro, por qué el orificio de una caja o un recipiente de garganta estrecha es más negro que el color más negro. Semejante caja con orificio sirve de modelo del cuerpo negro o de cuerpo negro artificial.

194. La temperatura del Sol.

¿Cómo se logró determinar la temperatura de la superficie del Sol?

La temperatura de la superficie solar se determina con arreglo a la ley de emisión del llamado cuerpo negro, es decir, de un cuerpo imaginario que absorbe el 100 % de la energía radiante que recibe (todos los cuerpos negros naturales, aun el negro de humo, no lo son absolutamente, pues rechazan cierta parte de los rayos que inciden sobre ellos). La ley física establecida por Stefan reza: la energía radiada por un cuerpo negro varía como la cuarta potencia de su temperatura absoluta.



Para el cálculo de la temperatura del sol

Por ejemplo, un cuerpo negro calentado hasta 2400 K (2127°C) emite 3, es decir 81 veces más energía que a los 800 K (527°C).

Para calcular la temperatura de la superficie del Sol partiendo de este dato, supongamos que el globo terráqueo se diferencia poco del cuerpo negro, y que la temperatura media de toda la superficie terrestre es de 17°C, o 290° K. El hecho de que en realidad las diversas zonas de esta última tienen una temperatura mayor o menor que la media, no influirá mucho en el resultado del cálculo (lo mismo que el hecho de que la Tierra no es un cuerpo negro).

Es posible calcular geométricamente que el limbo solar ocupa 1/188.000 parte de toda la esfera celeste 1. Vamos a suponer que la Tierra se encuentra en el centro de una esfera hueca de 150.000.000 km de radio (la distancia de la Tierra al Sol), y que cada unidad de superficie de esta última emite la misma cantidad de energía que el astro. En otras palabras, supongamos que todo el firmamento está cubierto de soles; serán 188.000 soles. Esta esfera resplandeciente enviaría al Globo 188.000 veces más energía que ahora.

Por consiguiente, la temperatura de nuestro planeta sería igual a la del astro, ya que en el caso de equilibrio térmico estabilizado se iguala la temperatura de todos los cuerpos.

También hay que considerar que en estas condiciones la Tierra emitiría tanta energía como recibiría (en otro caso no estaría en equilibrio térmico con la esfera resplandeciente, sino que se calentaría o enfriaría).

Como la Tierra recibiría toda la energía enviada por la esfera caliente, las cantidades de energía emitidas por ellas serían iguales. Pero dicha superficie esférica emite la misma cantidad de energía que el Sol; por consiguiente, la superficie del planeta despediría la misma cantidad de energía que este último, y, al mismo tiempo, 188.000 veces más de lo que está emitiendo ahora. La temperatura (en grados Kelvin) es proporcional a la raíz cuarta de la emisión; si esta magnitud es 188.000 veces mayor, resulta que la temperatura será

$$\sqrt[4]{188000}$$

es decir 20,8 veces más alta. Multiplicando 290° K (la temperatura del globo terráqueo) por 20,8, obtenemos 6000° K. ésta sería la temperatura del Globo. Como su temperatura equivaldría a la del Sol, de esta manera queda determinada la de este último: sería de unos 6000 K, es decir, de 5700°C.

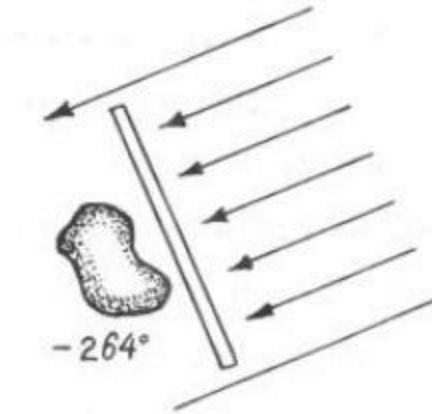
Este razonamiento que semeja la demostración de un teorema de geometría, pues requiere de construcciones auxiliares bastante complicadas, muestra cómo se las ingenian los físicos para examinar los hechos que no pueden ser estudiados por vía experimental.

195. La temperatura del Universo.

¿Qué se entiende por temperatura del Universo?

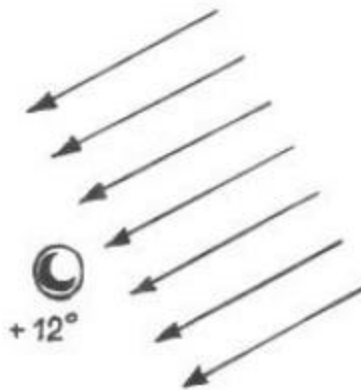
¿Qué temperatura tendrán los cuerpos que se encuentran en él?

Muchas personas utilizan el término «temperatura del Universo» seguras de que conocen y entienden su significado. Además, están muy seguras de que la temperatura del Universo es de 273 °C, y que todo cuerpo del espacio interplanetario, que no esté dentro de la atmósfera terrestre, debe estar enfriado hasta cero absoluto.



Un cuerpo dispuesto en el Universo a 150.000.000 km del sol y protegido de sus rayos, tendrá una temperatura de -264°C

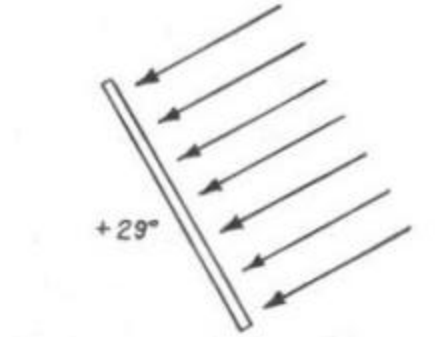
Tanto lo uno como lo otro son criterios equivocados. Primero, hay que tener en cuenta que un espacio que no contiene materia, no puede tener temperatura alguna. El término «temperatura del Universo» tiene significado convencional y no literal. Segundo, si todos los cuerpos del Universo tuvieran la temperatura de -273°C , el globo terráqueo, que también pertenece al Universo, correría la misma suerte; no obstante, la temperatura de la superficie terrestre es 290° mayor que el cero absoluto.



Los rayos solares calentarían hasta $+12^{\circ}\text{C}$ una bola metálica de 1 cm de diámetro, dispuesta a 150.000.000 km del Sol

En fin, ¿qué debemos entender por «temperatura del Universo»?

Esta es la temperatura que tendría el cuerpo negro (véase la respuesta al problema 194), protegido de los rayos del Sol y los planetas, es decir, sólo calentado por el calor de las estrellas. En distintas épocas esta magnitud se determinaba de distintas maneras, además, se obtenían valores diferentes. En opinión del físico francés C. Pouillet, su valor más probable sería de -142°C ; utilizando criterios muy diversos, su colega inglés H. Fröhlich obtuvo un valor de -129°C . El resultado más confiable lo proporciona el cálculo efectuado a base de la emisión de las estrellas y la ley de Stefan, siguiendo el mismo procedimiento que para determinar la temperatura del Sol.



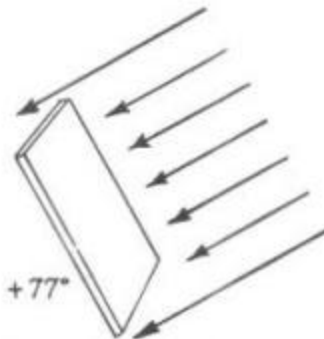
Un alambre fino, colocado perpendicularmente a los rayos solares y sujeto a las mismas condiciones, se calentaría a $+29^{\circ}\text{C}$

La radiación total de las estrellas de un hemisferio celeste es 5.000.000 de veces menor que la del Sol. Si el firmamento brillase como el Sol, su radiación sería

$$(5.000.000 * 188.000) / 2 = 470.000.000.000 \text{ veces}$$

mayor que la estelar.

Si la Tierra sólo fuera calentada por el calor de las estrellas, irradiaría una cantidad de energía 470.000.000.000 de veces menor que el Sol.



Una lámina metálica en estas mismas condiciones, tendría una temperatura de $+77^{\circ}\text{C}$

Dado que la temperatura absoluta es proporcional a la raíz cuarta de la radiación, la del Globo sería

$$\sqrt[4]{470000000000}$$

veces menor que la de la superficie solar.

Es sabido que la temperatura absoluta de esta última es de 6000 K, por lo cual las estrellas calentarían la Tierra en $6000 : 700$ grados, es decir, sólo en 9 grados más que la temperatura del cero absoluto, lo cual equivaldría a -264°C . ésta es la temperatura del Universo.

La temperatura media de nuestro planeta es mucho mayor que 9K, es de 290 K, ya que no sólo lo calienta la luz estelar, sino también los rayos del Sol. Si no existiera el Sol, en la Tierra reinaría un frío de -264°C .

Ahora está claro que cualquier objeto dispuesto en el espacio interplanetario, pero no protegido de los rayos solares, tendría una temperatura mucho mayor que los -264°C . La temperatura de dicho cuerpo dependería de su conductividad térmica, así como de su forma

y las propiedades de su superficie. A continuación ofrecemos algunos ejemplos que muestran, cuánto se calentarían diversos cuerpos en semejantes condiciones.

Una bola metálica de 1 cm de diámetro que conduce bien el calor, colocada a una distancia de 150.000.000 de kilómetros del Sol se calentaría hasta $+ 12^{\circ}\text{C}$.

Un alambre delgado y largo de sección circular, alejado a la misma distancia del Sol y colocado perpendicularmente a sus rayos, se calentaría hasta $+ 29^{\circ}\text{C}$. (El mismo alambre, dispuesto paralelamente a los rayos solares, se calentaría mucho menos.) Cualquier otro cuerpo de forma alargada, colocado perpendicularmente a los rayos solares, tendría una temperatura de $+12$ a $+29^{\circ}\text{C}$.

Una lámina metálica delgada, alejada del Sol a la misma distancia que la Tierra y dispuesta perpendicularmente a los rayos solares, se calentaría en el espacio interplanetario hasta 77°C . Si su cara que da a la sombra es de color claro y está pulida, mientras que la otra es negra y mate, se calentaría hasta $+ 147^{\circ}\text{C}$.

Se podría preguntar: ¿por qué, pues, nunca se calienta tanto semejante plancha metálica dispuesta en la superficie terrestre? Porque está rodeada de aire, y las corrientes de aire (la convección) se llevan parte de su calor, impidiendo que éste se acumule en ella. En la Luna, en cambio, donde no hay atmósfera, se calentaría hasta esa temperatura: es harto conocido cuánto se calienta la zona ecuatorial del satélite natural durante el día lunar. Si la cara negra de la referida lámina da a la sombra, en tanto que la pulida da al Sol, todo el objeto se calentará hasta una temperatura más baja, de -38°C . Estos datos tienen mucha importancia práctica para mantener las condiciones adecuadas en la cabina del globo estratostático y, especialmente, en la astronáutica. Cuando Piccard ascendió por primera vez a la altitud de 16 km en una cápsula cuyas dos mitades estaban pintadas de blanco y negro, esta última -a consecuencia de un defecto del mecanismo de giro- tuvo que permanecer durante algún tiempo virada del lado oscuro al Sol. Aunque fuera de aquella cabina de aluminio hacía un frío de -55°C , el tripulante sufrió mucho a causa del calor que hacía en su interior.

Los que tomaron parte en una expedición al Polo austral, se percataron de que la temperatura de los cuerpos alumbrados por el sol puede ser muy elevada, aunque la del medio ambiente sea muy baja. «Es interesante señalar que a la temperatura ambiente que generalmente era bastante baja, pocas veces superior a los 18°C bajo cero, escribió posteriormente uno de los expedicionarios, nuestro actinómetro (instrumento destinado a medir la energía de la radiación solar) a veces indicaba unos 46°C sobre cero.» Este fenómeno tiene numerosas aplicaciones industriales. Por ejemplo, en Tashkent (Asia Central) fue construido un dispositivo que eleva la temperatura hasta 200°C a expensas de la energía solar, sin emplear lentes ni espejos. En Samarcanda se hizo hervir agua calentada por rayos solares mediante el mismo procedimiento, a pesar de que la temperatura ambiente era de 14 grados bajo cero.

En el espacio extraterrestre sería posible calentar hasta una temperatura extraordinariamente alta un cuerpo de absorción selectiva, es decir, que no absorbe todos los rayos que recibe (como hacen los cuerpos negros), sino sólo los de determinada longitud de onda. Por ejemplo, el astrónomo francés Ch. Fabry calculó que un cuerpo que sólo absorba rayos azules de longitud de onda 0,004 mm y que se encuentre en la órbita terrestre en el espacio tendrá una temperatura de 2000°C aproximadamente: un trozo de platino cubierto de una capa de semejante sustancia se fundiría por la acción de los rayos solares. Es posible que a esas propiedades de la sustancia se deba la luminosidad de los cometas cuando se acercan al Sol.