

Técnicas Experimentales II

Laboratorio de Termodinámica

Demostraciones

Radiómetros

J. Güémez

Departamento de Física Aplicada,
Universidad de Cantabria.

Diciembre 5, 2003

La interacción de la radiación electromagnética –durante un tiempo se distinguió entre luz, radiación visible, y calor, radiación infrarroja– con las diversas superficies y los efectos térmicos que produce, así como la radiación producida por superficies a diferentes temperaturas, son un conjunto de fenómenos muy interesantes de analizar experimentalmente.

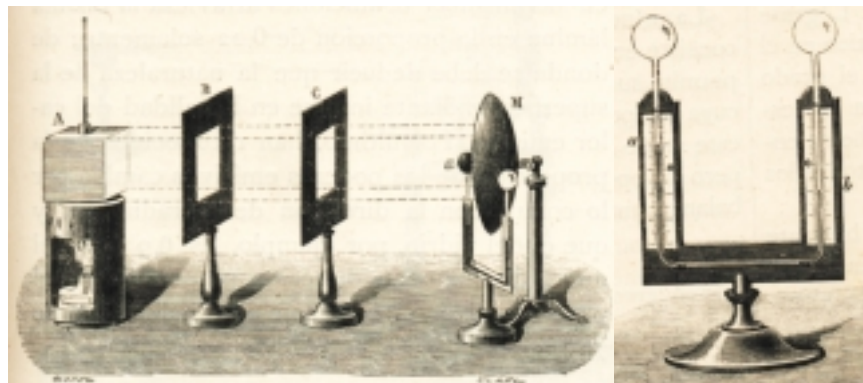


Figura 1: Experimentos de Leslie. Medida de poderes emisivos

Se toma como unidad de poder emisivo el del negro de humo, único cuerpo cuyos poderes reflector y emisivo pueden considerarse nulos. Rumford y Leslie hicieron las primeras investigaciones acerca de este punto. Llenando de agua caliente una vasija metálica colgada de un recinto de temperatura constante, Rumford observaba con un termómetro metido en la vasija el enfriamiento experimentado por el líquido en un minuto. Volvía á empezar el experimento cambiando la superficie de la vasija, pero partiendo siempre del mismo exceso de temperatura del agua sobre la ambiente. De este modo vió que el enfriamiento es más rápido cuando la superficie está ennegrecida, más lento si

esta es metálica, y por regla general, que esta rapidez variaba con la naturaleza ó estado de la superficie, deduciendo de aquí que el poder emisivo cambia con este estado.

Leslie hizo por la misma época otros experimentos más concluyentes, merced a un método en el que sólo influía la radiación. Como foco de calor de temperatura constante usaba una vasija metálica de forma cúbica llena de agua hirviendo en cuyo estado procuraba mantenerla. Las caras del cubo estaban formadas o forradas de las varias sustancias cuyo poder emisivo se quería poner á prueba, como placas de plata, cobre ó estaño bruñido, capas de negro de humo, blanco de cerusa, etc. A distancia invariable del cubo ponía una de las bolas de su termómetro diferencial, resguardando la otra de la radiación con una pantalla, y dirigía sucesivamente la radiación directa de cada cara del cubo sobre la bola del termómetro. Entónces anotaba los excesos de temperatura marcados por el instrumento tan luégo como se detenía, y admitiendo que estos excesos sean proporcionales á las intensidades del calor recibido por la bola. Para obtener efectos más marcados, colocaba Leslie detrás de la bola del termómetro diferencial un espejo esférico de latón bruñido, cuyo eje principal era perpendicular á la cara del cubo. En la Fig. 1 se ven dos pantallas con una aberturas cuadradas que limitan el haz radiante.

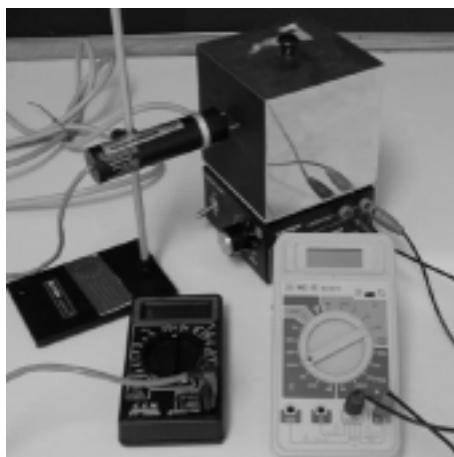


Figura 2: Cubo de Leslie. Medida de la radiación emitida por diversas superficies. Las superficies se calientan con la ayuda de una bombilla colocada en el interior del cubo. Se utiliza un sensor que transforma la radiación incidente en corriente eléctrica. La temperatura se mide con la ayuda de un termopar previamente calibrado.

El cubo de Leslie que se muestra en la Fig. 2 consta de cuatro superficies: una pintada de negro, otra pintada de blanco, una de aluminio bruñido y otra de aluminio mate. Lo que se encuentra experimentalmente utilizando el cubo de Leslie calentado hasta los 90 °C es que la radiación producida por la superficie pintada de negro es sensiblemente igual a la radiación emitida por la superficie pintada de blanco, bastante mayor que la emitida por la superficie metálica mate, y mucho mayor que la superficie metálica bruñida.

Cuando se disponen dos esferas de vidrio iguales llenas ambas de agua a

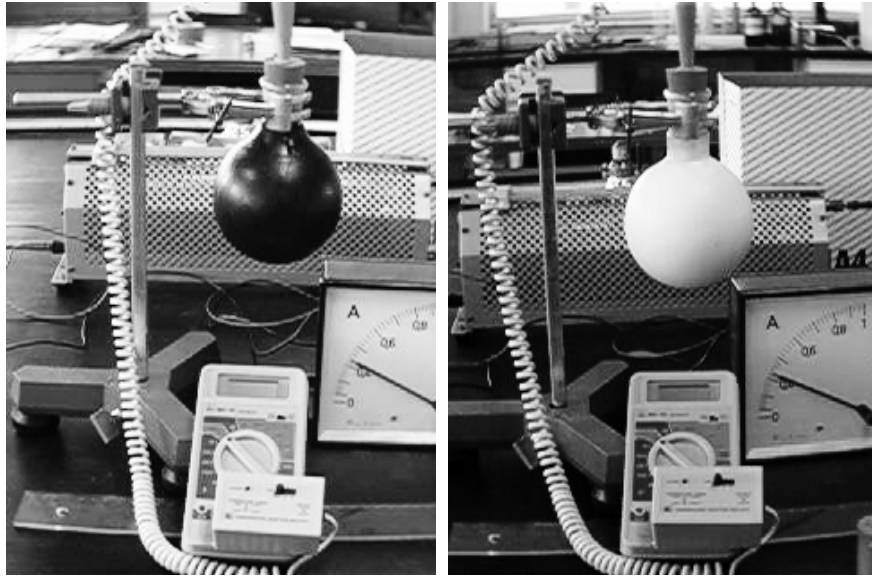


Figura 3: Esferas de vidrio llenas de agua, una de ellos pintada de negro, y la otra pintada de blanco.

la misma temperatura, próxima a los $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, se observa experimentalmente que ambas se enfrían a la misma velocidad. Sin embargo, cuando con el agua a temperatura ambiente ambas son iluminadas con una bombilla con la resistencia a muy alta temperatura, cerca de los 2500 K , y emitiendo luz visible, ambas esferas se calientan de forma diferentes y el agua de la esfera pintada de negro aumenta su temperatura más rápido que la esfera pintada de blanco. Cuando ambas esferas son iluminadas con una lámpara de radiación infrarroja, apenas hay diferencia en el calentamiento de ambas.

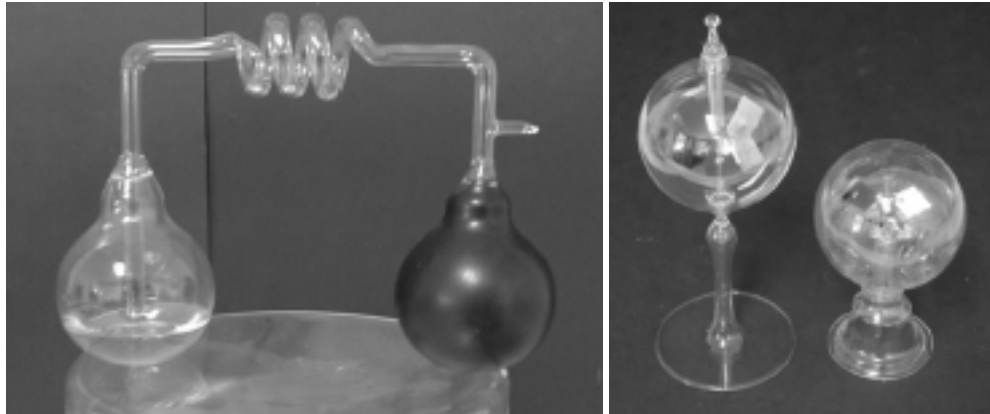


Figura 4: Bulbos de vidrio, uno de ellos pintado de negro, conectados por un tubo de vidrio, que en ambos llega casi hasta el fondo. Radiómetros de Crookes. El más alta tiene las superficies pintadas de negro por un lado y bruñidas por el otro, alternándose. El más pequeño tiene las superficies pintadas de negro por un lado y pintadas de blanco por el otro lado, alternándose.

Cuando el dispositivo que se muestra en la Fig. 4 es iluminado con una bombilla, el líquido pasa rápidamente al bulbo transparente.

Una vez que se analizan los resultados del cubo de Leslie –las superficies

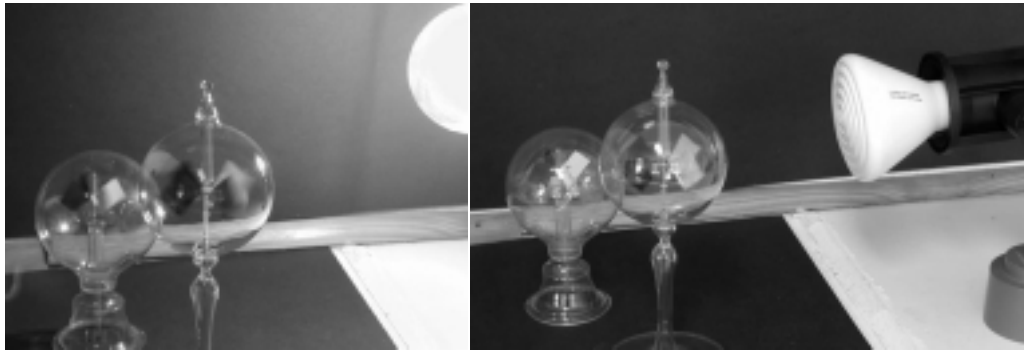


Figura 5: . Radiómetros iluminados por una bombilla de radiación visible y por una bombilla de infrarrojos.

pintadas de negro radian tanto como las pintadas de blanco, aunque mucho más que las superficies pulidas– y se considera la ley de Kirchhoff según la cual las buenas superficies emisoras son superficies que absorben bien la radiación, las experiencias de calentamiento de esferas llenas de agua pintadas una de negro y otra de blanco –se calienta más rápidamente la pintada de negro–, parecen enigmáticas.

Superficie	Fac. Reflectante	Superficie	Fac. Reflectante
Latón	100	Negro humo	0
Plata	90	Tinta de China	15
Plomo	60	Vidrio	10
Acero	83	Albayalde	10

Tabla 1: Facultad reflectante de algunas superficies obtenidas por Leslie. Se toma 100 para el latón.

Otro experimento también sorprendente en relación con el cubo de Leslie es el del radiómetro de Crookes. El radiómetro de Crookes es un instrumento diseñado originalmente para medir la presión de la radiación electromagnética. Consta de cuatro pequeños cuadrados puesto es los extremos de un aspa que pivota sobre una punta metálica fina sobre la que puede girar. Las caras de los cuadrados están pintadas de negro por un lado y de blanco por el otro lado y estos están colocados de tal forma que las superficies blancas y negras se van alternando en los cuatro. En otros radiómetros un lado está pintado de negro y el otro lado es de metal pulido, sin pintar. Todo el sistema se coloca dentro de un bulbo de vidrio en el que se ha hecho un vacío suficientemente alto.

Superficie	Fac. Absorbente	Superficie	Fac. Absorbente
Latón	0	Negro humo	100
Plata	10	Tinta de China	85
Plomo	40	Vidrio	90
Acero	17	Albayalde	90

Tabla 2: Facultad de absorción del calórico radiante de algunas superficies. Se toma 0 para el latón y 100 para el negro de humo.

Superficie	Fac. Radiante	Superficie	Fac. Radiante
Latón pulido	7	Negro humo	100
Plata pulida	5	Tinta de China	88
Plomo	45	Vidrio	90
Acero	17	Albayalde	100

Tabla 3: Facultad radiante (poder emisivo) de algunas superficies obtenidas por Leslie. Se toma 100 para el negro de humo.

En el caso de los radiómetros de Crookes, se tiene que ambos giran muy deprisa cuando son iluminados por una bombilla de resistencia a alta temperatura, que produce luz visible, aunque se observa que gira más lentamente el radiómetro cuyas superficies están pintadas de blanco y de negro en relación con el radiómetro uno de cuyos lados es de metal pulido.

Cuando son ambos radiómetros son iluminados por una lámpara de infrarrojos, sólo gira el radiómetro cuyas superficies opuestas a las pintadas de negro están bruñidas. El otro radiómetro, el que tiene ambos lados pintados, aunque uno de ellos sea de blanco, permanece en reposo.

Lo que se tiene en relación con las experiencias del cubo de Leslie y del radiómetro de Crookes no es contradictorio una vez se analiza correctamente. En primer lugar, la ley de Kirchhoff anteriormente citada se refiere a superficies que emiten y absorben a la misma temperatura (mismas longitudes de onda de las radiaciones absorbidas y emitidas). Si bien las superficies pintadas de negro emiten y absorben bien radiación a cualquier temperatura, no sucede lo mismo

con las superficies pintadas de blanco. Éstas últimas absorben bien la radiación infrarroja –y la emiten también bien, lo que sucede a bajas temperaturas–, pero absorben mal la radiación visible –y también la emiten mal, lo que sucede a altas temperaturas–. A 100 °C ambas superficies emiten en la zona de los infrarrojos y casi lo mismo, por lo que cuando se ponen en un radiómetro y son iluminadas con radiación infrarroja, éste prácticamente no gira. A temperaturas próximas a los 2500 K, temperatura de un filamento de bombilla, la superficie negra absorbe toda la radiación, pero la superficie blanca apenas absorbe la radiación visible. Si ambas superficies del cubo de Leslie se pusieran a esta temperatura se observaría que la superficie negra emite mucho más que la blanca. Por tanto, cuando el radiómetro es iluminado por la bombilla de luz visible, la superficie pintada de negro absorbe más la radiación que la pintada de blanco, las moléculas de aire en contacto con esta superficie alcanzan mayor temperatura que las moléculas de la superficie pintada de blanco y golpean con mayor velocidad dicha superficie negra, por lo que el radiómetro gira con las superficies negras huyendo de la luz.

Puesto que las superficies pulidas siempre absorben mal la radiación a cualquier temperatura, también la emiten mal a cualquier temperatura. Por esta razón, el radiómetro con superficies negras y pulidas gira tanto al ser iluminado por radiación visible como al ser iluminado con radiación infrarroja.

Este análisis indica que el radiómetro no funciona en caso de un vacío perfecto. En ausencia de moléculas de aire en el radiómetro nada material golpea las superficies y la presión de radiación no es suficiente como para vencer el pequeño rozamiento del pivote que gira.

Dos radiómetros como los anteriores son colocados en el interior de un frigorífico. Aunque hay descripciones que indican que gira en sentido contrario al sentido de cuando es iluminado, esto no se ha observado. Una vez enfriados durante tiempo suficiente, son puestos en el exterior, a temperatura ambiente. Entonces giran en sentido normal, pues la superficie negra se calienta algo más rápido que la superficie blanca.

Dos radiómetros como los anteriores se colocan enfrente de un fuego. Después de un cierto tiempo, se ponen en otro lugar de la habitación, casi a oscuras, lejos del fuego. El pintado de blanco y negro, que ha dejado de girar enfrente del fuego, comienza a girar en sentido contrario. La superficie pintada de negro se enfría más rápido que la superficie pintada de blanco –sólo un poco más rápido–, lo suficiente como para que durante un corto periodo de tiempo gire en sentido contrario.

Un radiómetro de Crookes consta habitualmente de dos pares de cuadrados, unidos dos a dos mediante una pequeña barra metálica, y soldados en cruz formando un aspa. Cada uno de los cuadrados consta de una superficie pintada de blanco y una superficie pintada de negro. El conjunto se apoya sobre un soporte tal, típicamente una aguja, que el rozamiento sea muy pequeño. El sistema se encuentra encerrado en un bulbo de vidrio. Para que el aspa del radiómetro gire al ser iluminado se necesita un vacío parcial dentro del bulbo

de vidrio del radiómetro.

- (i) Explicar a qué se puede deber que cuando el radiómetro se ilumina con la luz de una bombilla o con la luz del Sol, las superficies pintadas de negro se alejan de la luz, mientras que las blancas se acercan a ella.
- (ii) Demostrar que las presiones sobre la cara negra y sobre la cara blanca de cada superficie son, respectivamente, $P_N = mn(v_N - u)^2$ y $P_B = mn(v_B + u)^2$, siendo m el peso molecular de gas del radiómetro, n la densidad molecular del gas, $u = r\omega$, siendo r el radio del aspa y ω la velocidad angular de rotación del aspa, y v_N y v_B la velocidad media de las partículas en contacto con la cara negra y la cara blanca de cada superficie, respectivamente.
- (iii) Denominando T_N y T_B las temperaturas de las caras negras y blancas, respectivamente, de las superficies, obtener la velocidad angular de rotación en función de r , m , y las temperaturas anteriores.
- (iv) Sabiendo que un radiómetro tiene una velocidad de rotación de $\omega \approx 10 \text{ rad s}^{-1}$, estimar la temperatura de la cara negra sabiendo que $r = 5 \text{ cm}$, $m = 29 \text{ g mol}^{-1}$ y tomando $T_B \approx 300 \text{ K}$.

[S. Olivier, H. Gié, *Thermodynamique*, Exercice E1.2, pp. 42-43]

- (i) Aunque en la región de los infrarrojos las superficies pintadas de blanco emiten y absorben tanto como las superficies pintadas de negro (experiencias de Leslie), no sucede lo mismo en la zona del visible y las superficies blancas reflejan mucho más la radiación que las superficies negras, por lo que estas alcanzan temperaturas más altas. En consecuencia, las moléculas de aire próximas a la superficie negra tienen una velocidad media mayor que las moléculas de aire próximas a las superficies blancas.

Cuando se dispone de dos tipos de radiómetros, uno con las caras plateadas y pintadas de negro y el otro con una cara pintada de blanco y la otra pintada de negro, se observa que frente a los infrarrojos el primero gira más rápido que el segundo, que apenas gira. Frente a la luz visible, o con bastante componente visible, siempre gira más rápido el que tiene la clara más reflectante, la plateada.

- (ii) Suponiendo que las moléculas se mueven todas con la velocidad media, v_N en el caso de las moléculas próximas a la superficie negra y v_B en el caso de las moléculas próximas a la superficie blanca, puesto que las superficies negras se alejan de la luz con velocidad u , las moléculas que golpean esa superficie lo hacen con una variación de momento de $2m(v_N - u)$ (o lo que es lo mismo, respecto de las moléculas que golpean lo que interesa es su velocidad relativa respecto de la superficie). Puesto que en la unidad de tiempo dt , $1/2$ del número de moléculas contenidas en

un volumen $An(v_N - u)dt$, siendo A la sección de la superficie, chocarán contra la superficie, se tiene que la variación del momento viene dada por

$$dp_N = mAn(v_N - u)^2 dt \rightarrow \frac{dp}{dt} = F_N = mAn(v_N - u)^2.$$

Por tanto, la presión ejercida sobre la superficie negra será

$$P_N = \frac{F_N}{A} = mn(v_N - u)^2.$$

Razonando del mismo modo sobre la superficie blanca, teniendo en cuenta que se aproxima a la luz con velocidad u , por lo que se aproxima a las moléculas, se tiene que en la unidad de tiempo dt , $1/2$ del número de moléculas contenidas en un volumen $An(v_B + u)dt$ golpearán esa superficie y, finalmente,

$$P_B = \frac{F_B}{A} = mn(v_B + u)^2.$$

- (iii) Puesto que la fuerza neta que actúa sobre superficie del aspa es (en valor absoluto)

$$F_T = F_N - F_B,$$

y el momento del par de fuerzas que se origina es

$$\tau = 2F_T r = I\omega = I\frac{u}{r},$$

siendo $I = mr^2$ el momento de inercia del aspa. Por tanto,

$$2F_T = Mu,$$

siendo $M = A\rho_S$ la masa de las superficies del radiómetro y ρ_S su densidad superficial de masa.

Teniendo en cuenta que $v_N = \sqrt{3RT_N/m}$ y que $v_B = \sqrt{3RT_B/m}$, se tiene que

$$F_T = Amn \left[\frac{3R}{m} (T_N - T_B) - \sqrt{\frac{3R(T_N + T_B)}{m}} u \right],$$

de donde

$$Amn \left[\frac{3R}{m} (T_N - T_B) - \sqrt{\frac{3R(T_N + T_B)}{m}} u \right] = \rho_S \omega r,$$

- (iv) Cuando se alcanza el régimen estacionario la velocidad angular es constante, y también la velocidad lineal, por lo que la fuerza neta que se ejerce sobre cada superficie es nula. En ese caso, con u

$$v_N - u = v_B + u \rightarrow v_N - v_B = 2u = 2\omega r.$$

Poniendo las velocidades en función de las temperaturas, se tiene que

$$\sqrt{\frac{3R(T_B - T_N)}{m}} = 2\omega r .$$

Poniendo m en kg mol^{-1} y ω en radianes por segundo, rad s^{-1} (2π por revoluciones por segundo) se puede obtener esta diferencia de temperaturas.

Referencias

- [1] A. Guillemin, *El Mundo Físico*. Montaner y Simon Eds, Barcelona 1882, pp. 144-150.
- [2] R. M. Sutton, *Demonstration Experiments in Physics*. McGraw-Hill, New York 1938, p. 201.
- [3] A. Arenas, L. Victoria, F. J. Abellán, J. A. Ibáñez, *Dynamic characterization of a windmill radiometer*, Eur. J. Phys. **17**, 331 (1996)
- [4] R. A. Bartels, *Do darker objects really cool faster?*, Am. J. Phys. **58**(3), 244-8 (1990)
- [5] R. E. Bell, *The reversing radiometer*, Am. J. Phys. **51**, 584 (1983)
- [6] W. Bürger, *El molinete de luz. El radiómetro*, Taller y Laboratorio, Investigación y Ciencia **297**(junio), 82 (2001).
- [7] H. A. Carter, *Selective heating effect in the radiometer*, Am. J. Phys. **19** 386 (1951)
- [8] R. Coisson, E. Rancan, *Quantitative use of a Crookes radiometer*, Physics Educ. **14**, 58 (1979)
- [9] F. S. Crawford, *Running Crooke's radiometer backwards*, Am. J. Phys. **53**, 1105 (1985)
- [10] F. S. Crawford, *Running Crooke's radiometer backwards*, Am. J. Phys. **54**, 490 (1986)
- [11] M. Goldman, *The radiometer revisited*, Physics Educ. **13**, 427 (1978)
- [12] A. E. Woodruff, *The radiometer and how it does not work*, The Physics Teacher **6**, 358 (1968)