

## RADIACIÓN DE CUERPO NEGRO

### Fundamento teórico

Un cuerpo negro ideal es aquél que en frío absorbe toda la radiación electromagnética que recibe y en todas las frecuencias. Se ve negro porque no refleja la luz de ninguna longitud de onda. El ejemplo cotidiano más parecido al ideal es el carbón. Cuando el cuerpo está caliente emite radiación electromagnética (un trozo de carbón a 1000° C se ve rojo brillante, tal como se observa en una barbacoa) y su comportamiento está gobernado por las siguientes leyes, encontradas primero experimentalmente y cuya explicación teórica fue dada por M. Planck (1900) lo que supuso el arranque de la Mecánica Cuántica.

1) Ley de Stefan-Boltzmann. La radiancia o intensidad de radiación emitida (potencia emitida por unidad de superficie del cuerpo negro) es proporcional a la cuarta potencia de  $T$ :

$$R_r = \sigma T^4 \quad (1)$$

donde  $\sigma$  es la constante universal de Stefan-Boltzmann, de valor  $5.6696 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ .

2) Ley del desplazamiento de Wien. La radiación no es emitida con igual intensidad en todas las longitudes de onda del espectro electromagnético, sino que es máxima para una longitud de onda  $\lambda_m$  tal que

$$\lambda_m T = b \quad (2)$$

siendo  $b = 2.8978 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$ , otra constante universal (cte de Wien).

Un cuerpo negro se construye experimentalmente mediante una cavidad hueca con un pequeño orificio al exterior. Las paredes internas de la cavidad se recubren con hollín por lo que en frío prácticamente toda la radiación que entra por el orificio es absorbida. La boca del orificio se comporta entonces como un cuerpo negro. Un metal a altas temperaturas se comporta aproximadamente también como un cuerpo negro.

La intensidad detectada de la emisión de un cuerpo negro (potencia detectada por unidad de superficie del detector) es proporcional al inverso del cuadrado de la distancia entre emisor y detector.

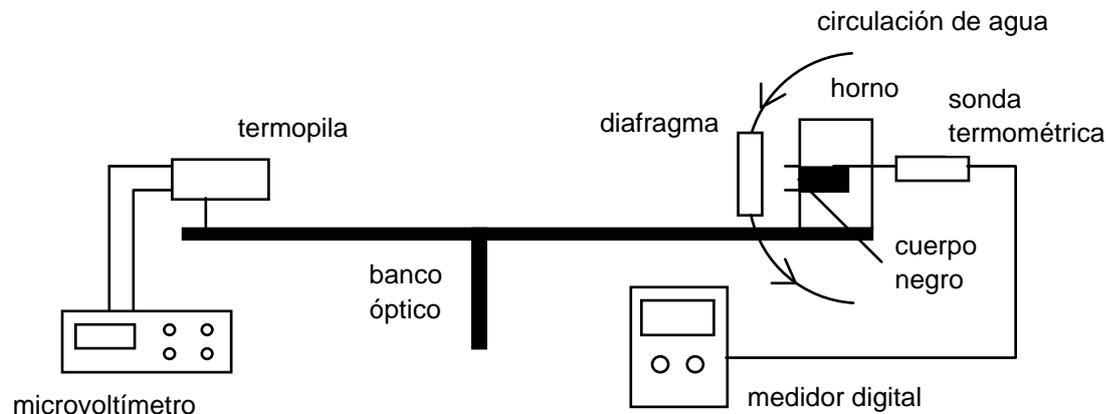
### Montaje experimental

Disponemos de dos montajes experimentales diferentes. Con cada uno de ellos se pueden observar unas características distintas, de modo que se dedicará a cada uno de ellos la mitad del tiempo correspondiente a esta práctica. A partir de ahora los llamaremos 3a y 3b.

## Montaje A

Véase figura siguiente. Sobre un banco óptico reglado se encuentra colocado un horno, su boca es el cuerpo negro. La temperatura del horno se controla con un transformador regulable. Hay que tener precaución de no tocar el horno o las superficies en contacto con él dado que se halla caliente y puede producir quemaduras. Delante del horno se coloca un diafragma, refrigerado, cuya función es impedir que llegue al detector cualquier radiación procedente de las paredes del horno, cuando sólo interesa la que procede de la boca. También llega al detector radiación de otros objetos calientes en el laboratorio, que tendremos que evaluar y restar. El detector es una termopila que se encuentra al otro lado del banco óptico. Consiste en un conjunto de termopares con un extremo pegado a una superficie negra y el otro a la carcasa externa. La superficie negra absorbe la radiación y se calienta, lo que produce en los termopares un voltaje proporcional a la potencia de radiación recibida (**factor de conversión:  $1 \text{ mW} \leftrightarrow 0.16 \text{ mV}$** ) y que se mide en un microvoltímetro.

La termopila es un instrumento de precisión que debe manejarse con cuidado. No debe ser golpeada, y hay que tener en cuenta que, dado que mide diferencias de temperatura entre la superficie negra interior y la carcasa, deben evitarse las variaciones de temperatura en su entorno, que pueden falsear las medidas (especialmente, no tocar el tubo con la mano). Además, cualquier radiación externa distinta de la del cuerpo negro será detectada por la termopila. Un esquema del montaje se puede ver en la figura. Por último las lecturas de la termopila indican realmente el calentamiento de la superficie negra, por lo tanto al cambiar la intensidad de radiación recibida hay que esperar cierto tiempo a que se establezca una nueva situación de equilibrio (dinámico) en que las lecturas se mantengan constantes.



## Realización de la práctica 3a

Dado que el horno presenta una fuerte inercia térmica, las medidas de cada grupo se realizarán a una temperatura fijada previamente. Cambiarla cuesta horas y no debe tocarse el regulador. Para estudiar la dependencia con la temperatura, se utilizarán los datos medidos por varios grupos en distintos días, que habrá que compartir. La temperatura se lee en el multímetro digital, a partir de la medida realizada en el interior del horno por la sonda termométrica. La práctica consiste en obtener la intensidad de radiación que detecta la termopila a varias distancias del cuerpo negro. Para comenzar, se conecta la refrigeración del diafragma, con lo que se reduce la emisión de radiación del propio diafragma. Luego se regula la distancia de la termopila al cuerpo negro. Ello se lleva a cabo moviendo el soporte

de la termopila, sin tocar en ningún momento la posición del horno que contiene el cuerpo negro, ya que está caliente y puede producir quemaduras. Como en cualquier experimento óptico, se debe cuidar que exista un correcto alineamiento entre el emisor (cuerpo negro), el diafragma y el detector (termopila), cuya entrada debe apuntar hacia el cuerpo negro tanto en dirección horizontal como en altura. Hay que tener en cuenta que la distancia de medida es la que queda entre la ventana de entrada de la termopila (las paredes internas están epejadas y se supone que toda la radiación que entra por la boca llega al fondo y es detectada) y la boca del horno, que es el cuerpo negro.

Una vez dispuesta la distancia y alineado el sistema, se debe quitar la ventana de protección de la termopila. Tras esperar a que las condiciones se estabilicen, se realizarán unas diez lecturas en el microvoltímetro, con una separación temporal entre ellas de 30 segundos. Tras esto se preparará el sistema para medir el fondo de la radiación recibida. Para ello, sin desplazar la termopila, hay que cubrir la boca del horno con un algodón húmedo (si no está húmedo se va a quemar), esperar a que las condiciones se estabilicen y realizar las lecturas en el microvoltímetro. Consideraremos que la radiación debida al cuerpo negro la obtenemos de la diferencia entre ambas medidas.

Hay que repetir las medidas para cuatro distancias distintas que serán elegidas por el alumno con objeto de ajustar de la mejor manera posible la dependencia de la intensidad con el inverso del cuadrado de la distancia. Con objeto de disponer de datos compartidos homogéneos, **una de las distancias tiene que ser 25 cm.**

## Cuestiones

a) Mostrar la dependencia de la intensidad detectada (total menos fondo) con el inverso del cuadrado de la distancia. Una buena forma (y usual) de realizar el ajuste es utilizar logaritmos de los resultados obtenidos y ajustar la ley mediante mínimos cuadrados a una recta. Representa tu ajuste (incluyendo los errores experimentales) y discute la estimación obtenida para el exponente y su error. Representa también el resultado de la medida de la intensidad total y del fondo.

b) Para ajustar con el experimento realizado la ley de Stefan-Boltzmann hay que obtener la relación entre la intensidad detectada por la termopila (potencia recibida por unidad de superficie del detector), que es el resultado de las medidas, y la intensidad emitida (potencia por unidad de superficie del cuerpo negro). Obtén la relación entre ambas, sabiendo que:

\* La ventana de la termopila tiene una superficie circular de diámetro 2.5 cm;

\* El cuerpo negro es un disco de radio 1 cm.

\* La radiación emitida por la superficie caliente no se distribuye por igual en todas direcciones sino que es mayor en la dirección de la normal a la superficie y está dada por la ley de Lambert:

$$I(\theta) = I_0 \cos \theta$$

siendo  $\theta$  el ángulo que forma el radio vector de un punto con la normal a la superficie.

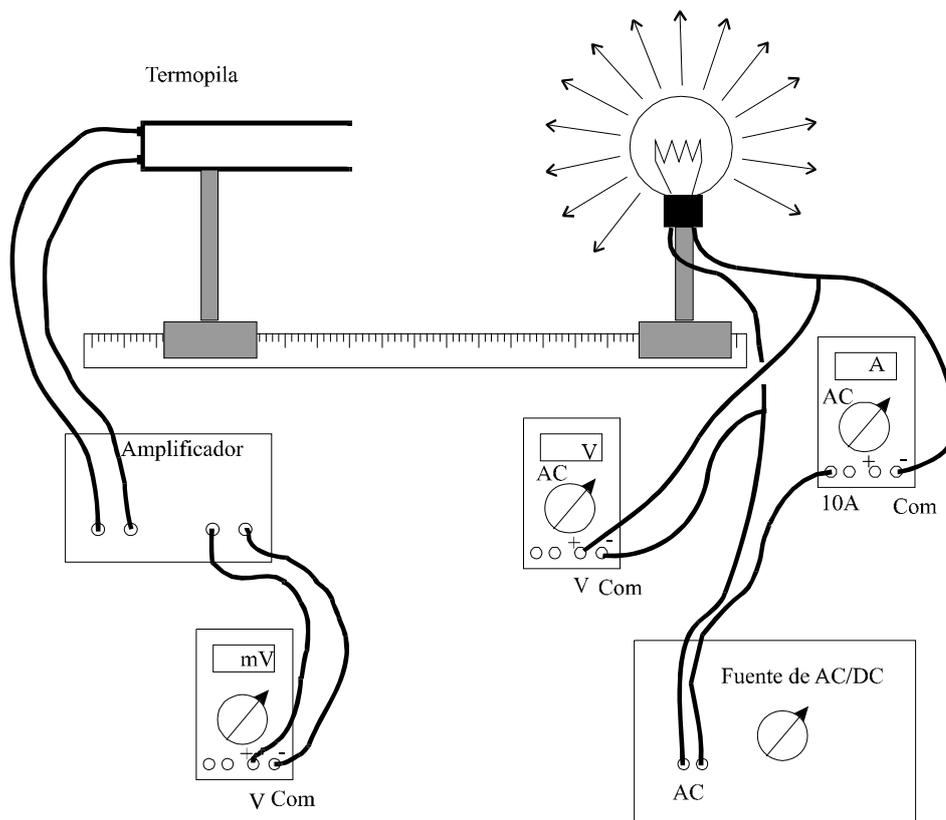
Lo que se mide es el valor de  $I_0 = P_D/A$  (ya que  $\cos \theta = 1$  para la posición del detector) siendo  $P_D$  la potencia recibida por la termopila y  $A$  su área mientras que la potencia total emitida por la superficie circular es

$$P_T = \int_{\substack{\text{semiesfera} \\ \text{deradiador}}} I_0 \cos \theta dS = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} I_0 \cos \theta r^2 \sin \theta d\theta = \pi r^2 I_0$$

Es posible que los resultados no se ajusten a la ley de Lambert. En caso de distribución isótropa de la emisión (igual en todas direcciones) se cumple que la potencia recibida es  $P_D/P_T = A/2\pi r^2$ , y si no se da ninguno de los dos casos extremos el coeficiente que va delante de  $I_0$  en la fórmula anterior puede ser un valor entre  $\pi r^2$  y  $2\pi r^2$ .

c) A partir de los datos compartidos para varias temperaturas, comprueba la ley de Stefan-Boltzmann, y representa gráficamente el ajuste realizado. Obtén un valor para la constante  $\sigma$ , trata de estimar el error cometido y discute las razones de la discrepancia entre el valor obtenido y el real.

## Montaje B



En este caso el cuerpo *aproximadamente negro* es el filamento de una bombilla. Para la realización de las medidas de radiación el montaje se realizará como indica la figura. Para mejorar los contactos eléctricos, las conexiones entre los terminales de la fuente, el amperímetro, el voltímetro y los terminales de la bombilla se realizan mediante una caja de conexiones en la que todos los puntos unidos por bandas negras están conectados interiormente. Al aplicar un voltaje eléctrico constante, circula una corriente por él y se disipa una potencia eléctrica  $P$  según las bien conocidas fórmulas:

$$\text{Ley de Ohm : } I = V / R \quad (3)$$

$$\text{Ley de Joule : } P = VI = RI^2 = V^2 / R \quad (4)$$

siendo  $V$  la diferencia de potencial eléctrico en el filamento,  $I$  la intensidad de corriente y  $R$  la resistencia.

Esta potencia eléctrica hace aumentar paulatinamente la temperatura del filamento de modo que (¡ley de Wien!) se va poniendo rojo, anaranjado, amarillo, azul, etc... hasta que se fundiría si no hubiera ningún mecanismo que permitiera evacuar esta potencia al exterior. En realidad la resistencia de la bombilla aumenta con la temperatura, lo que hace disminuir la potencia suministrada conforme se va calentando, a voltaje constante. Por otro lado la bombilla disipa potencia al exterior, por conducción, convección y radiación aunque en la práctica sólo este último mecanismo es relevante a altas temperaturas ya que el filamento está en una cápsula de gas inerte a muy baja densidad. Según la ley de Stefan (1) cuanto mayor es la temperatura, mayor es la potencia radiada y como es menor la suministrada, la bombilla se

calienta hasta alcanzar una temperatura constante de equilibrio en la que toda la potencia eléctrica suministrada se emite al exterior por radiación.

La temperatura se puede determinar de dos formas independientes:

i) Mediante **la medida de la resistencia eléctrica del filamento** y sabiendo que para el Wolframio (metal que lo constituye) se conoce la resistencia en función de la temperatura. Los datos se encuentran en las tablas de Landolt-Börnstein y se pueden aproximar por:

$$r(T) = 8.35 \times 10^{-4} * T^{1.24357} \quad (5)$$

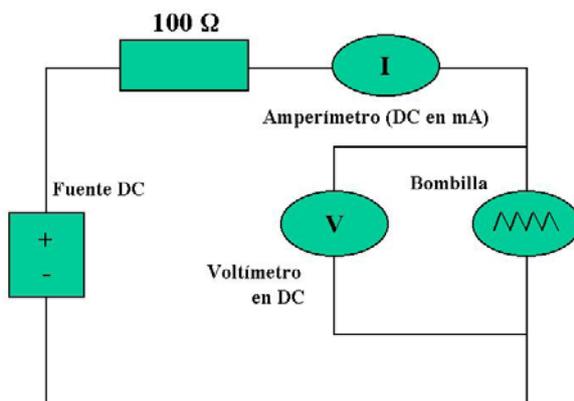
Siendo  $R(T)$  la resistencia a una temperatura  $T$ , expresada en Kelvin,  $r(T) = R(T)/R_0$  y  $R_0$  la resistencia a 293 K, que se puede medir fácilmente.

ii) Mediante la ley de Wien. Se necesita un espectrómetro para determinar en qué longitud de onda se da la máxima emisión a una temperatura dada, que es lo que hacen instrumentos ópticos llamados **pirómetros**. Así se determina por ejemplo la temperatura de la superficie del Sol. Como no disponemos de uno de ellos usaremos **una tabla de colores** de las que se usan en metalurgia para estimar la temperatura de una fundición por el color. El método no es muy preciso pero permite apreciar variaciones de unos 50 K (dependiendo de la agudeza del observador) para metales que están a temperaturas del orden de 1000 K o poco más. En este sentido hay que advertir que el color observado es una media ponderada de todas las longitudes de onda que se emiten. Así el Sol tiene el máximo de emisión en el centro del espectro visible, pero no se ve verde porque emite en las otras longitudes de onda visibles casi tanto como en el máximo dando una superposición blanca, de modo que es difícil apreciar a simple vista la diferencia de color entre cuerpos que estén a más de, digamos, 1500 K. Por el otro extremo, con cuerpos “muy fríos” (debajo de unos 800 K) la cantidad de radiación es muy pequeña y además la mayor parte de ella infrarroja e invisible, por lo que sería necesario observarlos en la oscuridad absoluta para poder apreciar algo y aun así la estimación de la temperatura será muy imprecisa.

La radiación emitida se puede detectar mediante una termopila similar a la descrita en la parte 3a) de esta práctica. El voltaje generado por la termopila se amplifica y se lleva a un voltímetro digital cuyas lecturas, en principio, son proporcionales a la intensidad de radiación (= potencia por unidad de superficie de detector) recibida.

### Desarrollo de la parte 3b)

1) Determinar la resistencia de la bombilla a temperatura ambiente. Para desarrollar esta parte, el montaje (ver el esquema eléctrico adjunto) es similar al descrito antes para el desarrollo general de la práctica, pero con un par de diferencias:



a) Conviene usar la fuente en DC y por lo tanto el amperímetro y el voltímetro deben estar también en escalas de DC.

b) Se intercala una resistencia de 100 Ω en serie con el circuito de calefacción para asegurarnos de **aplicar corrientes muy débiles**.

Deberemos aplicar voltajes de 0 a 20 V DC en la fuente, que corresponderán a valores  $V$  mucho más bajos en la bombilla. Para cada valor apuntar el voltaje  $V$  en la bombilla y la intensidad  $I$ . Hacer unas 5 ó 6 medidas de voltaje e intensidad **sin pasar de 200 mA**. Representar  $V$  frente a  $I$  y deducir la resistencia del ajuste de los puntos a una recta.

Dado que la bombilla se enfría muy lentamente, no debe haber estado encendida por lo menos dos horas antes de realizar esta parte. Si otro grupo ha realizado esta práctica antes hay que cambiar de bombilla o usar sus datos.

2) Realizar el montaje normal, como se describió al principio. El circuito para calentar la bombilla es casi igual, pero ahora sin la resistencia de  $100 \Omega$ , lo que permitirá hacer pasar intensidades más elevadas por ella para que se caliente. Además ahora conviene usar la salida de la fuente AC (es indiferente pero se alcanzan voltajes mayores) de 0 a 15 V, aunque hay que comenzar por 1 V y no pasar de 8 V. El amperímetro debe estar conectado en la posición especial para medir por lo menos hasta 5 A de AC. Todos estos valores se dan como indicación, pero dependen del tipo de bombilla. Por encima de unos 1400 K (ver tabla de colores) su vida no será larga.

Conectar la termopila, colocada a unos 20 cm del filamento de la bombilla (distancia estimativa, recordad que la distancia se debe medir del filamento de la bombilla a la boca de la termopila). Verificar la lectura con la bombilla apagada (**fría**) o quitada. Si no es cero su valor habrá que restarlo de todas las medidas posteriores, ya que se deberá a la radiación de fondo recibida de los objetos luminosos o calientes que haya en el laboratorio.

Aplicar voltajes cada vez más elevados hasta que comience a encenderse. Cuando tome un color visible (normalmente con 1 V aplicado, pero depende del tipo de bombilla), medir el voltaje y la intensidad de corriente y las indicaciones de la termopila. Si la intensidad no es constante hay que esperar a que se estabilice ya que el filamento tarda un tiempo de algunos segundos en alcanzar la situación estacionaria, cuando la potencia radiada es igual a la potencia eléctrica suministrada. La termopila también tarda un tiempo hasta estabilizar sus valores.

Hay que alinear el tubo de la termopila con la dirección que apunta a la bombilla. Para ello girarla hasta obtener la máxima indicación. Girar también la bombilla hasta obtener la máxima indicación, lo que se conseguirá con el filamento perpendicular a la línea bombilla-termopila

A partir de ahora hay que aplicar voltajes cada vez más elevados pero SIN PASAR DE 8 VOLTIOS EN EL VOLTAJE APLICADO (aunque depende del tipo de bombilla) y para cada voltaje, después de esperar al equilibrio, tomar datos del voltaje, la intensidad, el voltaje en la termopila, el color del filamento y la temperatura estimada según la tabla de colores.

Hacer una tabla de valores con varias columnas en las que anotaremos:

- Voltaje en la bombilla,  $V_B$ .
- Intensidad en la misma,  $I_B$ .
- Voltaje en la termopila,  $V_T$ .
- Color del filamento.
- Temperatura aproximada según el color, usando tabla, cuando se aprecie,  $T_C$ .

- Resistencia de la bombilla (calcular para cada par de datos V,I),  $R_B$ .
- Potencia eléctrica suministrada (calcular),  $P_S$ .
- Temperatura obtenida a partir de la medida de resistencia (calcular),  $T_R$ .
- Raíz cuarta de  $P_S$
- Raíz cuarta del voltaje en la termopila,  $V_T^{1/4}$ .

Observar las temperaturas calculadas a partir de la resistencia y las estimaciones a partir de la tabla de colores.

Representar gráficamente la potencia suministrada y el voltaje en la termopila elevados a  $1/4$  en función de la temperatura absoluta. Los dos valores en una misma gráfica con diferente escala para la ordenadas: una escala a la izquierda y otra a la derecha.

Representar la potencia suministrada (Y) como función de la indicación de la termopila (X) e interpretar el resultado obtenido.

3) Hacer una estimación de la superficie radiante del filamento (ésta es la mayor indeterminación en la práctica) y deducir un valor de la constante de Stefan-Boltzmann.