GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE INDUSTRIA, ENERGÍA
Y TURISMO

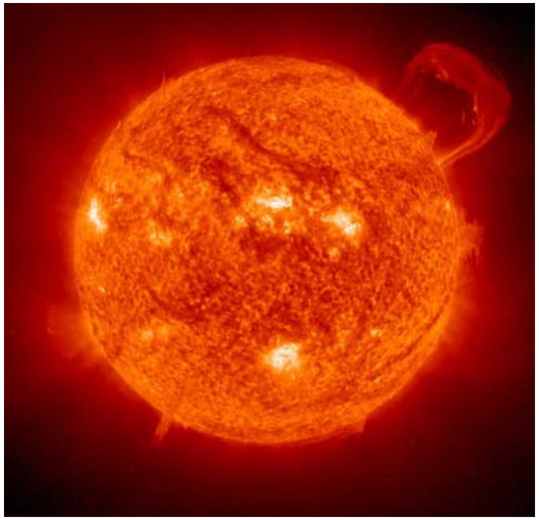
El uso de la luz para la medida de temperatura

María José Martín

CENTRO ESPAÑOL
DE METROLOGÍA

Algo de historia…

Todo cuerpo a una temperatura > 0 K emite radiación electromagnética. Esto es algo muy evidente cuando observamos cuerpos muy calientes que emiten radiación electromagnética en el rango visible: hierro candente, brasas ardientes, la lava, el sol, …



- El primer intento : M'Sweeny (1828) focalizó la radiación de un cuerpo caliente en el bulbo de un termómetro de mercurio utilizando un espejo cóncavo.
- Kirchhoff (1859): ley que lleva su nombre y que describe la relación entre la absorción y la emisión del flujo radiante de la superficie de un material. En el año siguiente estableció el concepto de cuerpo negro
- La relación teórica entre la radiancia espectral de un cuerpo negro y su temperatura termodinámica no se establecería hasta finales del siglo XIX por Wien (1894-1896) y Planck (1900).

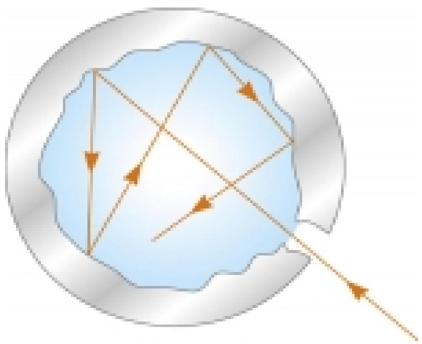
G.R. Kirchoff (1824-1897)

Max Planck (1858-1947)

Cuerpo negro

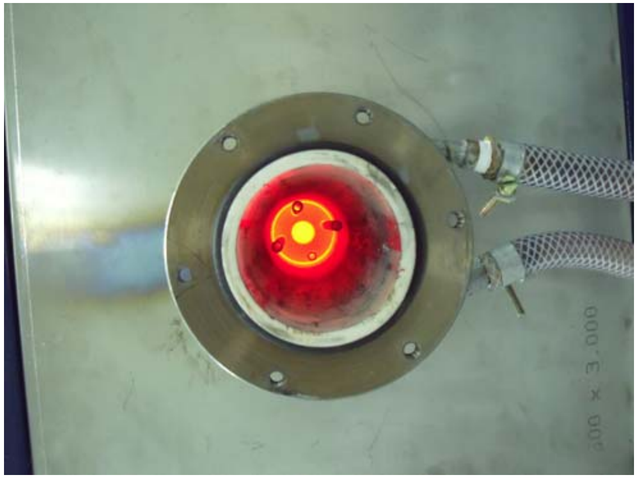
Un cuerpo negro es una superficie ideal que tiene las siguientes propiedades:

- absorbe toda la radiación incidente independientemente de la longitud de onda y de la dirección
- para una determinada temperatura y longitud de onda ninguna superficie puede emitir más que un cuerpo negro
- la radiación emitida es independiente de la dirección, es decir, el cuerpo negro es un emisor isotrópicamente difuso (lambertiano)



El cuerpo negro, como perfecto absorbente o emisor de radiación, es el radiador ideal que comparamos con las propiedades radiantes de superficies reales.

La aproximación más cercana a un cuerpo negro ideal es la apertura de una cavidad de un material opaco (no brillante, mate) con su superficie interna a una temperatura constante.



Ley de Planck

La fórmula de la distribución espectral de la radiación de un cuerpo negro la obtuvo por primera vez Planck utilizando consideraciones de la mecánica cuántica y tiene la forma:

$$L_\lambda(T) = \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1} = \frac{c_{1L}\lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1}$$

$$c_{1L} = 2hc^2 \qquad c_2 = \frac{hc}{k}$$

Esta ley se obtiene sumando los estados de energía posibles de un sistema de partículas (en este caso fotones) con una distribución estadística de energía canónica, es decir, que la energía total fija del sistema se reparte con la misma probabilidad entre todas estados de dicho sistema ($P_i \propto \beta E_i$*, donde *P_i* es la probabilidad del estado de energía *E_i*). Si este sistema está en contacto térmico con un foco de temperatura *T*, entonces *$\beta = (kT)^{-1}$* y si se considera a las partículas como osciladores cuánticos, *$E_i \propto h\nu_i$

Aquí se ha escrito la primera constante de radiación para radiancia en unidades de W·m²/sr *cuyo valor es* $1{,}19104 \times 10^{-16}$ W·m²/sr. *La definición de la primera constante de radiación se suele dar para exitancia* $c_1 = 2phc^2$ en W·m², *cuyo valor es* $3{,}7418 \times 10^{-16}$ W·m².

$c_2 = 0{,}014388$ m·K

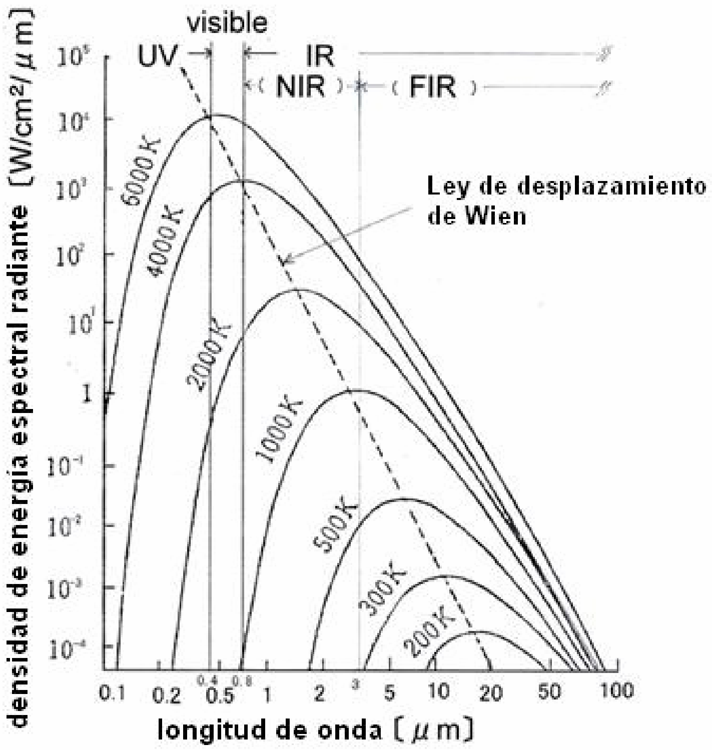
Significado de la Ley de Planck

$$L_\lambda(T) = \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1} = \frac{c_{1L}\lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1}$$

Todos los cuerpos a la misma temperatura tienen la misma distribución espectral

La radiación de un cuerpo negro a 5800 K (el sol) cae principalmente en la región visible del espectro electromagnético, sin embargo, para cuerpos negros con temperaturas inferiores a 800 K, la radiación cae predominantemente en la parte infrarroja del espectro.

Por esta razón, la selección de una longitud de onda u otra en el detector nos permitirá o no medir a ciertas temperaturas. De una forma simplificada podemos decir que temperaturas altas implican longitudes de onda visibles y temperaturas bajas longitudes de onda infrarrojas.



Tipos de termómetros de radiación:

Termómetros de radiación ópticos, basados en detectores fotoeléctricos, es decir, la intensidad radiante es medida al producirse una señal eléctrica por la absorción de fotones en una transición electrónica que responde específicamente a la energía del fotón.

Pueden ser clasificados por sus longitudes de onda, visibles e infrarrojos, y por su ancho de banda, de "paso de banda estrecho" (espectrales, a los que se les puede asignar una longitud de onda efectiva, p. e. termómetros de radiación patrón) y de "paso de banda ancho" (con un ancho de banda al que no es posible asignar una longitud de onda efectiva).

Cualquier sistema de medida de temperatura fotoeléctrica debe tener:
1) un sistema óptico capaz de enfocar la energía radiante desde el blanco en un detector
2) filtros u otros medios para seleccionar las longitudes de onda que se van a utilizar en la medida
3) uno o más detectores para transformar la intensidad radiante en una señal eléctrica apropiada
4) amplificadores y otros componentes para convertir la señal del detector en una señal utilizable

Escala internacional de temperatura EIT-90:

Para temperaturas superiores al punto de la Ag (961,78 ºC) la EIT-90 define T a partir de la ley de Planck:

$$\frac{L_\lambda(T_{90})}{L_\lambda(T_{90}(x))} = \frac{e^{c_2/\lambda \cdot T_{90}(x)} - 1}{e^{c_2/\lambda \cdot T_{90}} - 1}$$

donde $T_{90}(x)$ es cualquiera de los puntos fijos de la Ag, Au o Cu, L_λ son las radiancias a la longitud de onda en el vacío λ y c_2 la 2ª constante de Planck

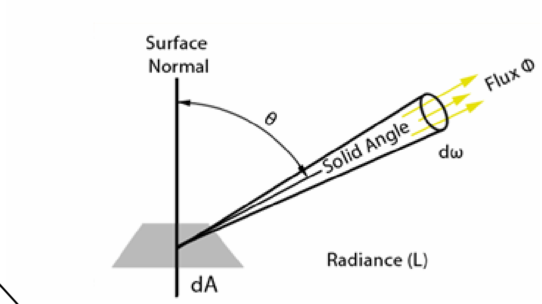
Requisitos del termómetro:
- Monocromático
- lineal

GOBIERNO DE ESPAÑA
MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO

Radiometría absoluta:

Este método requiere la determinación precisa de la potencia óptica emitida, en una banda espectral conocida y un ángulo sólido conocido, por una cavidad isoterma de emisividad conocida para poder obtener *T* de la ley de Planck

$$L_\lambda(T) = \frac{c_{1L}\lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \qquad \mathbf{W \cdot \underbrace{sr^{-1} \cdot m^{-2}} \cdot nm^{-1}}$$



Un detector patrón calibrado. La calibración se debe hacer por comparación a un radiómetro criogénico de sustitución eléctrica

El sistema geométrico de medida debe incluir dos aperturas de precisión a una distancia determinada para definir el campo de visión del radiómetro. La calibración de los diámetros de estas aperturas y su distancia de separación nos da la trazabilidad a las unidades de longitud y de ángulo sólido.

El radiómetro óptico se calibra frente al detector patrón para obtener la responsividad espectral del mismo. La longitud de onda calibrada de la fuente proporciona trazabilidad a la unidad de longitud.

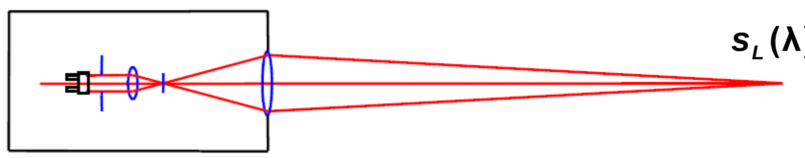
Por ejemplo, método de la radiancia:

La medida de la potencia óptica (vatios radiantes) requiere un **radiómetro óptico** (detector mas filtro espectral) con una responsividad espectral absoluta en radiancia conocida.

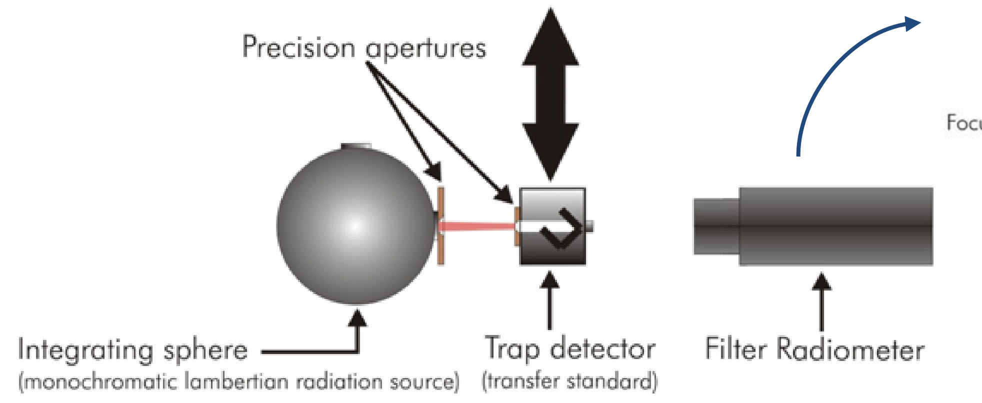
$$i_{ph} = \int s_L(\lambda) L_\lambda(\lambda,T)\, d\lambda$$

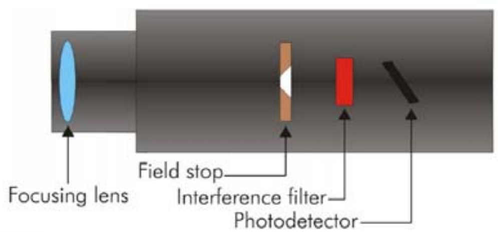
$$s_L(\lambda) = G \frac{i_{ph,radiom}}{i_{ph,patron}} \frac{s_\Phi^{patron}(\lambda_c)}{A_{patron}} s_{relativa}(\lambda),\quad A/[L]$$

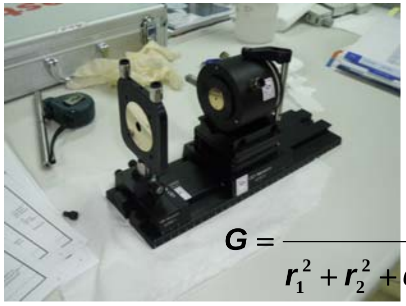
$$L_\lambda(T) = \frac{c_{1L}\lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T}-1}$$



Calibration and Use



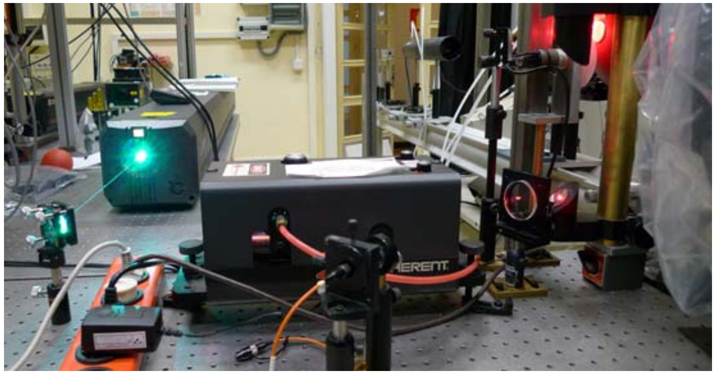




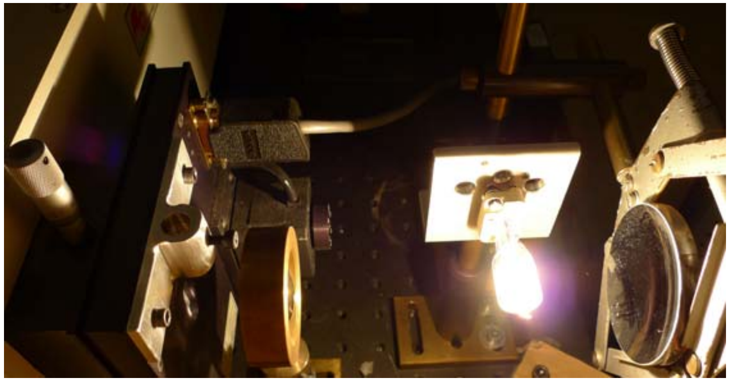
$$G = \frac{2\pi r_1^2}{r_1^2+r_2^2+d^2+\sqrt{(r_1^2+r_2^2+d^2)^2-4r_1^2r_2^2}}$$

Radiómetros del CEM:

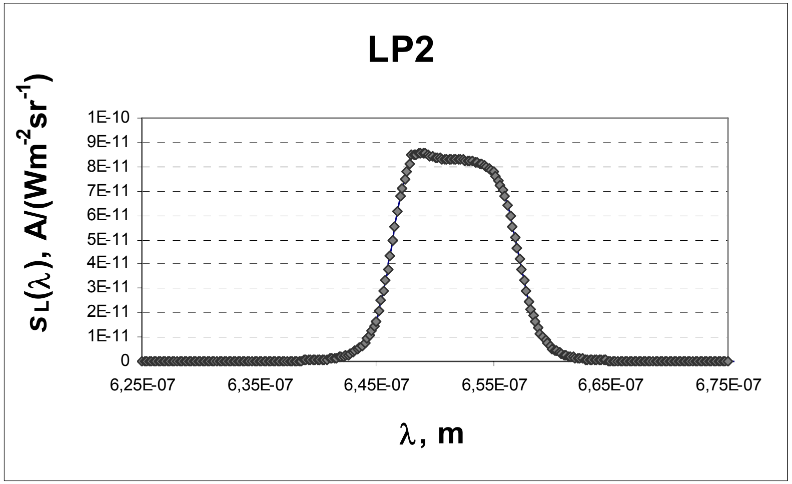
Fuentes coherentes: láseres



Fuentes incoherentes:
lámparas de incandescencia,
fuentes de luz supercontinuas…
+ monocromador



Cálculo de la temperatura, por aproximación S-H:



t_{EIT-90}, °C	t_{LP2}, °C	Δt, °C	U, °C
1084,62	1084,56	0,06	0,36
1324	1324,01	-0,01	0,45
1737,9	1738,18	-0,28	0,65
2474,2	2474,65	-0,45	1,13

$$\boxed{i_{ph} = \frac{a_1}{\exp\left(\frac{c_2}{a_2 T + a_3}\right) - 1}}$$

$$a_1 = c_1 \int \frac{s_L(\lambda)}{\lambda^5} d\lambda \qquad a_2 = \lambda_0 \left(1 - 6\frac{\sigma}{\lambda_0}\right)^2 \qquad a_3 = \frac{c_2}{2}\left(\frac{\sigma}{\lambda_0}\right)^2$$

$$\sigma^2 = \frac{\int (\lambda - \lambda_0)^2 s_L(\lambda) d\lambda}{\int s_L(\lambda) d\lambda} \qquad \lambda_0 = \frac{\int \lambda s_L(\lambda) d\lambda}{\int s_L(\lambda) d\lambda}$$

Gracias por su atención

María José Martín