

POLITECNICO DI MILANO

Misure Meccaniche e Termiche

**Termografia**

Ing. Lorenzo Comolli

## Misure a distanza

Le misure di temperatura a distanza tramite termocamere hanno diversi vantaggi:

- no effetto di carico
- prontezza molto migliore
- misure in molti punti -> campi di temperatura
- si rimane in sicurezza (da elementi in tensione o troppo caldi, ...)




Termografia POLITECNICO DI MILANO

## Richiami teorici

**Emissività  $\epsilon$ :** rapporto tra l'energia radiante emessa da un certo corpo ad una data temperatura e quella emessa dal corpo nero alla stessa temperatura.

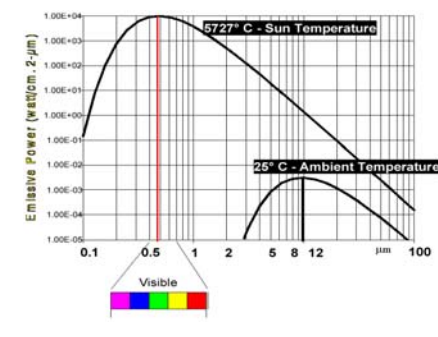
**Potere assorbente  $\alpha$ :** la frazione di energia assorbita rispetto all'energia radiante totale che dall'esterno incide sul corpo.

**Corpo nero:** corpo ideale il cui potere assorbente è pari a uno, cioè corpo capace di assorbire tutta l'energia radiante su di esso incidente, senza rifletterne alcuna parte; quindi l'emissione spettrale del corpo nero è soltanto funzione della temperatura. Per questo motivo viene usato come **riferimento** nelle tarature degli strumenti di misura per irraggiamento.



Termografia POLITECNICO DI MILANO

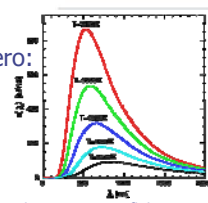
## Emissione del corpo nero



Termografia POLITECNICO DI MILANO

## Legge di Planck

Descrive l'emissione del corpo nero:

$$W_{BB}(\lambda, T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot c^2 \cdot h}{\lambda^5 \left[ e^{\frac{hc}{\lambda k T}} - 1 \right]}$$


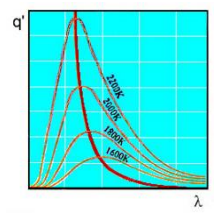
$W_{BB}(\lambda, T)$ : intensità della radiazione emessa da una superficie piana di un corpo nero in una semisfera per unità di area, alla lunghezza d'onda  $\lambda$  e temperatura  $T$  [W/m<sup>2</sup>].

$c$  = velocità della luce nel vuoto [299 792 458 m/s]  
 $h$  = costante di Planck [6.625\*10<sup>-34</sup> J s]  
 $\lambda$  = lunghezza d'onda della radiazione [m]  
 $k$  = costante di Boltzman [1.3806505 \*10<sup>-23</sup> J/K]  
 $T$  = temperatura assoluta del corpo nero [K]

Termografia POLITECNICO DI MILANO

## Legge di Wien

Stabilisce una corrispondenza semplice tra la temperatura  $T$  del corpo nero (o grigio) e la lunghezza d'onda  $\lambda_{max}$  in corrispondenza del **massimo** di emissione:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$


$b$ : costante di spostamento di Wien, vale: 2897,768  $\mu\text{m} \cdot \text{K}$

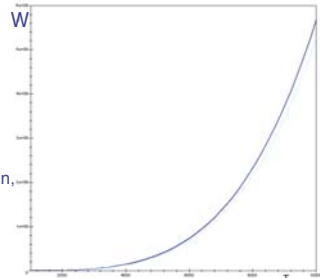
Termografia POLITECNICO DI MILANO

## Legge di Stefan-Boltzmann

Integrale della legge di Plank in lunghezza d'onda, esprime l'energia totale  $W$  irradiata da un corpo nero in funzione della temperatura  $T$ :

$$W = \sigma T^4$$

$\sigma$ : costante di Stefan-Boltzmann, vale  $5,6704 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ .



Termografia

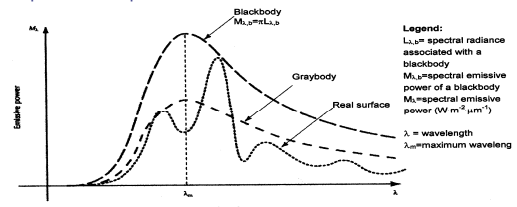
POLITECNICO DI MILANO

## Corpo grigio

Un corpo si definisce grigio quando il suo coefficiente di assorbimento è costante al variare della lunghezza d'onda e della temperatura.

In modo analogo anche il coefficiente emissivo sarà costante al variare della lunghezza d'onda e della temperatura.

Spesso le superfici reali non permettono di utilizzare questa importante semplificazione.



Legend:  
 $L_{\lambda, \mu}$  = spectral radiance associated with a blackbody  
 $M_{\lambda, \mu}$  = spectral emissive power of a blackbody  
 $M_{\lambda, \mu}$  = spectral emissive power of a graybody  
 $M_{\lambda, \mu}$  = spectral emissive power of a real surface  
 $\lambda$  = wavelength  
 $\lambda_m$  = maximum wavelength

Termografia

POLITECNICO DI MILANO

## Legge di S.B. per i corpi grigi

È possibile correggere la legge di Stefan-Boltzmann adattandola al generico corpo:

$$W_{GB} = \epsilon \sigma T^4$$

$\epsilon$  = emissività del corpo

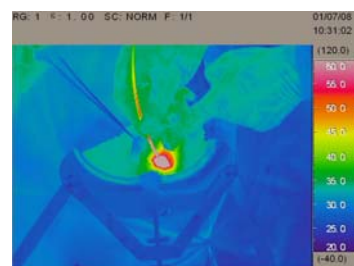
- $\epsilon = 1$  per i corpi neri
- $0 < \epsilon < 1$  per un corpo generico
- $\epsilon = 0$  per uno specchio ideale

Termografia

POLITECNICO DI MILANO

## Applicazioni della termocamera

- ◆ operazioni al fegato



Termografia

POLITECNICO DI MILANO

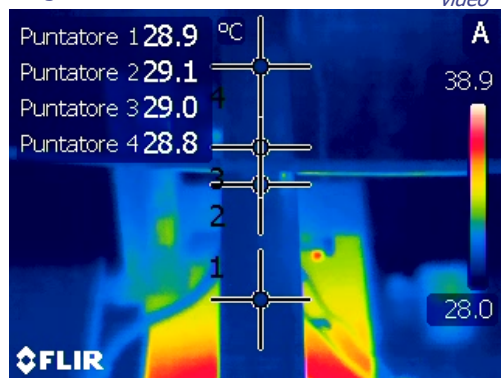
- ◆ pantografi ferroviari



Termografia

POLITECNICO DI MILANO

- ◆ pantografi ferroviari



Termografia

POLITECNICO DI MILANO

♦ uniformità riscaldatori

video

NO. 1 \* 1.00 SC: NIK42 F. 1.15 07/09/18 10:40:59 (120.0)

video

Termografia POLITECNICO DI MILANO

♦ isolamento termico edifici

RG: 1 \* 1.00 SC: NORM (120.0)

Termografia POLITECNICO DI MILANO

♦ controlli industriali e manutenzione

Mandata intercooler Filtro aria Turbo compressore Scarico motore

Termografia POLITECNICO DI MILANO

♦ controlli industriali e manutenzione

RG: 1 \* 1.00 SC: NORM 07/02/09 03:37:52 (120.0)

Termografia POLITECNICO DI MILANO

♦ tubazioni sotto la pavimentazione

Termografia POLITECNICO DI MILANO

♦ componenti elettronici

cortesia MULTIS S.p.A.

Termografia POLITECNICO DI MILANO

◆ riscaldatori gomme

Termografia POLITECNICO DI MILANO

### Esperienza di laboratorio: misura emissività

$$W_{ogg} = \varepsilon \sigma T_{ogg}^4$$

$$W_{back} = \sigma T_{back}^4$$

$$W_{back,rifl} = (1 - \varepsilon) \sigma T_{back}^4$$

**Ipotesi: ambiente circostante a temperatura uniforme (raramente vero)**

Sulla termocamera è possibile impostare l'emissività, assunta costante in tutto il campo di vista.  
Potenza misurata dalla termocamera (a seconda dell'impostazione di emissività):

$$W_{\varepsilon=1} = \sigma T_{ogg, \varepsilon=1}^4$$

$$W_{\varepsilon \neq 1} = \varepsilon \sigma T_{ogg, \varepsilon \neq 1}^4 + (1 - \varepsilon) \sigma T_{back}^4$$

Termografia POLITECNICO DI MILANO

Se si impone che  $W_{\varepsilon=1} = W_{\varepsilon \neq 1}$  si ottiene:

$$\sigma T_{ogg, \varepsilon=1}^4 = \varepsilon \sigma T_{ogg, \varepsilon \neq 1}^4 + (1 - \varepsilon) \sigma T_{back}^4$$

e quindi:

$$T_{ogg, \varepsilon=1} = \sqrt[4]{\varepsilon T_{ogg, \varepsilon \neq 1}^4 + (1 - \varepsilon) T_{back}^4}$$

Termocamera (imp. a  $\varepsilon=1$ )

$$T_{ogg, \varepsilon \neq 1} = \sqrt[4]{\frac{T_{ogg, \varepsilon=1}^4 - (1 - \varepsilon) T_{back}^4}{\varepsilon}}$$

Temperatura reale

$$\varepsilon = \frac{T_{ogg, \varepsilon=1}^4 - T_{back}^4}{T_{ogg, \varepsilon \neq 1}^4 - T_{back}^4}$$

Termografia POLITECNICO DI MILANO

### Esempio 1:

noto:

- $T_{ogg, \varepsilon=1} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ , temperatura misurata dalla termocamera assumendo  $\varepsilon=1$
- $\varepsilon=0.8$ , ovvero l'oggetto osservato è grigio
- $T_{back} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , temperatura dell'ambiente circostante

Si ricava che la temperatura vera dell'oggetto vale:

$$T_{ogg, \varepsilon \neq 1} = \sqrt[4]{\frac{(273,15 + 80)^4 - (1 - 0.8)(273,15 + 25)^4}{0.8}} K = 363.55 K = 90.4 \text{ }^\circ\text{C}$$

=> errore di 10.4 °C! (se nella misura con termocamera non si tiene conto dell'emissività)

Termografia POLITECNICO DI MILANO

### Esempio 2:

noto:

- $T_{ogg, \varepsilon \neq 1} = 90 \text{ }^\circ\text{C}$ , temperatura dell'oggetto misurata con un termometro a contatto
- $T_{ogg, \varepsilon=1} = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ , temperatura dell'oggetto misurata con la termocamera, assumendo  $\varepsilon=1$
- $T_{back} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ , temperatura dell'ambiente circostante

Si ricava che l'emissività dell'oggetto vale:

$$\varepsilon = \frac{(273.15 + 70)^4 - (273.15 + 25)^4}{(273.15 + 90)^4 - (273.15 + 25)^4} = 0.63$$

Termografia POLITECNICO DI MILANO

### Esempi di emissività

Materiale	Emissività	Materiale	Emissività
Alluminio lucido	0.04	Acqua liquida	0.95-0.96
Foglio di alluminio	0.09	Ghiaccio	0.97
Alluminio molto ossidato	0.2-0.3	Vernice	0.96
Alluminio anodizzato	0.77	Vernice nera al silicone	0.93
Ferro lucidato	0.14-0.38	Asfalto	0.93
Ferro arrugginito	0.61	Mattone rosso grezzo	0.9
Acciaio ossidato	0.79	Vetro comune	0.92
Acciaio inox lucido	0.08	Carta	0.93
Oro puro e lucidato	0.018-0.035	Gomma	0.86-0.94
Granito	0.25	Sabbia	0.76
Legno	0.91	Plastica	0.7-0.9
		Pelle umana	0.98

Termografia POLITECNICO DI MILANO

## Emissività funzione di T e $\lambda$

L'emissività per i corpi reali varia in funzione di:

- ♦ temperatura
- ♦ lunghezza d'onda

Esempio per il platino:

