Modulo 1

La termografia infrarossa e il problema termico inverso

parte I

La termografia infrarossa (IR)

Dr. Sergio Marinetti

Consiglio Nazionale delle Ricerche - Istituto per le Tecnologie della Costruzione

Programma del modulo

- Introduzione alla comprensione delle immagini termografiche
  - Concetti di base della trasmissione del calore
  - Termografia infrarossa
  - Esempi di applicazione
  - Principi di base dell'elaborazione di immagini e sequenze termografiche
- Il problema termico diretto
  - Modelli analitici
  - Modelli semi-analitici
  - Modelli numerici
- Il problema termico inverso
  - Obiettivi
  - Studio di casi reali in diversi settori di applicazione

Cos'è il calore

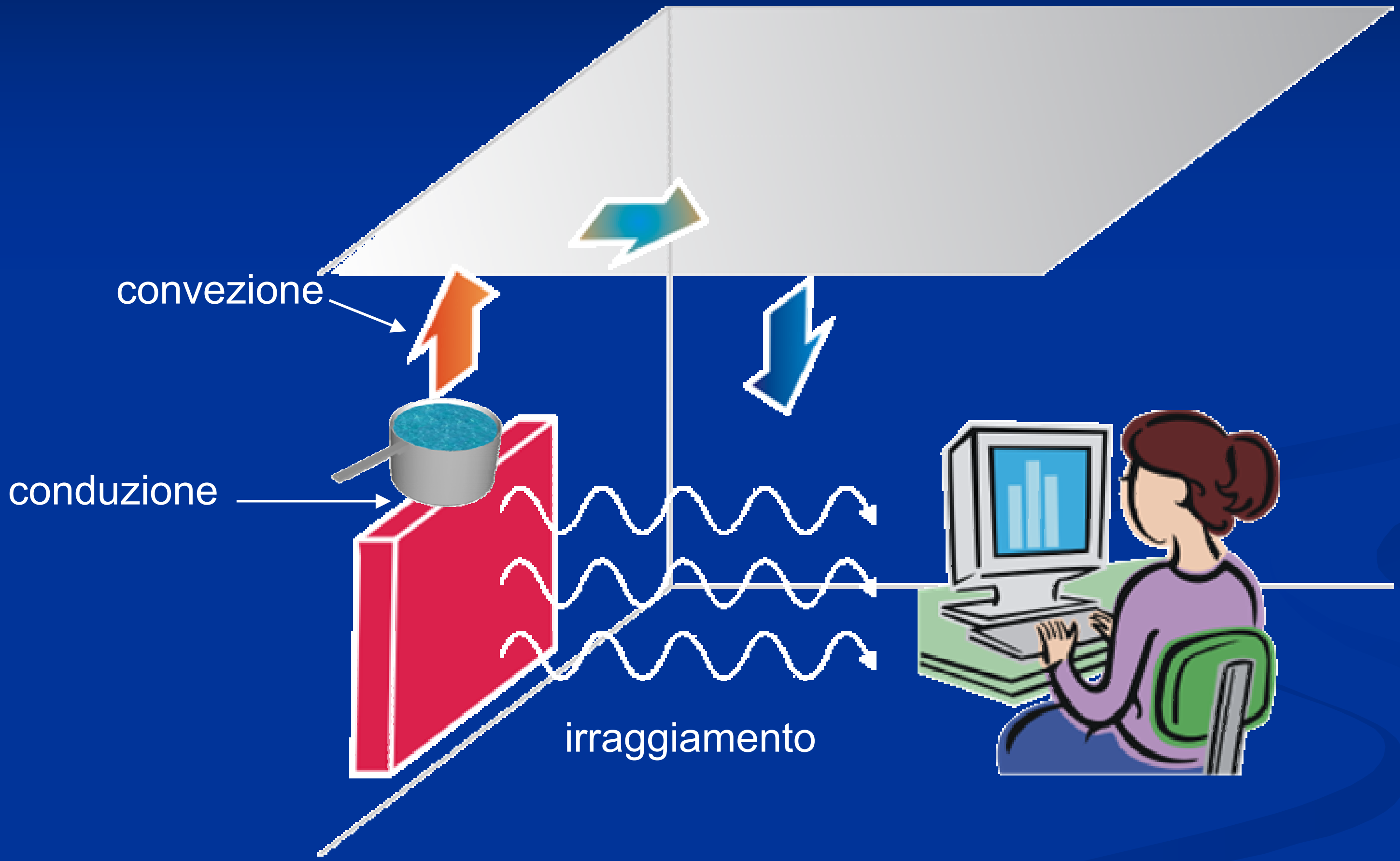
- Fino a tutto il 700 si pensava che fosse un fluido che scorre tra oggetti a temperatura diversa
- Il calore è lo scambio di *energia* causato da differenze di temperatura
- Il calore fluisce spontaneamente da un corpo caldo a uno più freddo
- Il calore si misura in joule o calorie

1 joule=0.2388 cal

Meccanismi di trasmissione del calore (1)

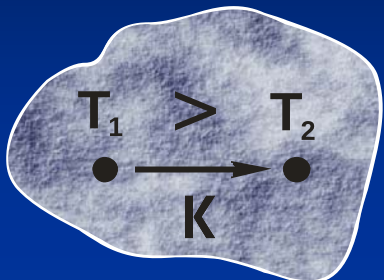
- CONDUZIONE: viene trasferita, all'interno dello stesso corpo o tra corpi in contatto, energia cinetica per urti tra molecole attraverso la materia
- CONVEZIONE: avviene in un fluido in movimento in cui parti calde trasferiscono durante il loro moto (generalmente turbolento) calore a parti più fredde
- IRRAGGIAMENTO: la trasmissione di calore avviene a distanza (anche nel vuoto) per emissione e assorbimento di onde elettromagnetiche

Meccanismi di trasmissione del calore (2)



Lo scambio di calore in formule

Conduzione

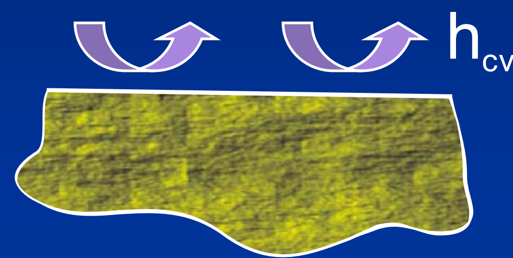


$$Q_{cd} = -K \frac{\partial T(x,\tau)}{\partial x}$$

$$Q_{cd} = \frac{T_2 - T_1}{R}$$

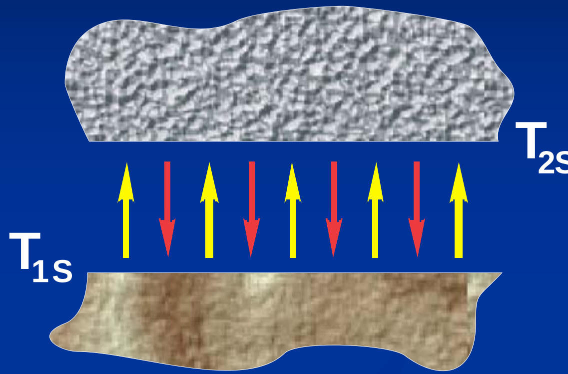
Convezione

$T_{solido} > T_{fluido}$



$$Q_{cv} = h_{cv}(T_{solido} - T_{fluido})$$

Irraggiamento



$$Q_{rd} = \frac{\sigma G\left(T_{1s}^4 - T_{2s}^4\right)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

T : temperatura	[K o °C]
Q : densità di potenza (flusso termico)	[W/m^2]
K : conduttività termica	[W/(m K)]
R : resistenza termica	[m^{2}K/W]
h_{cv} : coefficiente di scambio termico per convezione	[W/(m^{2}K)]
σ: costante di Stefan-Boltzmann 5.67x10^{-8}	[W/(m^{2}K^4)]
ε : emissività	

Equazione della conduzione del calore

- La trasmissione del calore per conduzione è regolata dalla seguente equazione

$$C\rho\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_x\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_y\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda_z\frac{\partial T}{\partial z}\right)+w(x,y,z)$$

- $w(x,y,z)$: tasso di generazione di energia interna per unità di volume [W/m^3]
- ρ: densità [kg/m^3]
- C: calore specifico [J/(kg K)]

Per la soluzione di questa equazione dovremmo fissare delle condizioni iniziali e al contorno.

Solido isotropo e omogeneo

$$\boxed{\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \qquad \alpha=\frac{\lambda}{C\rho}}$$

Solido isotropo e omogeneo in regime stazionario (equazione di Laplace)

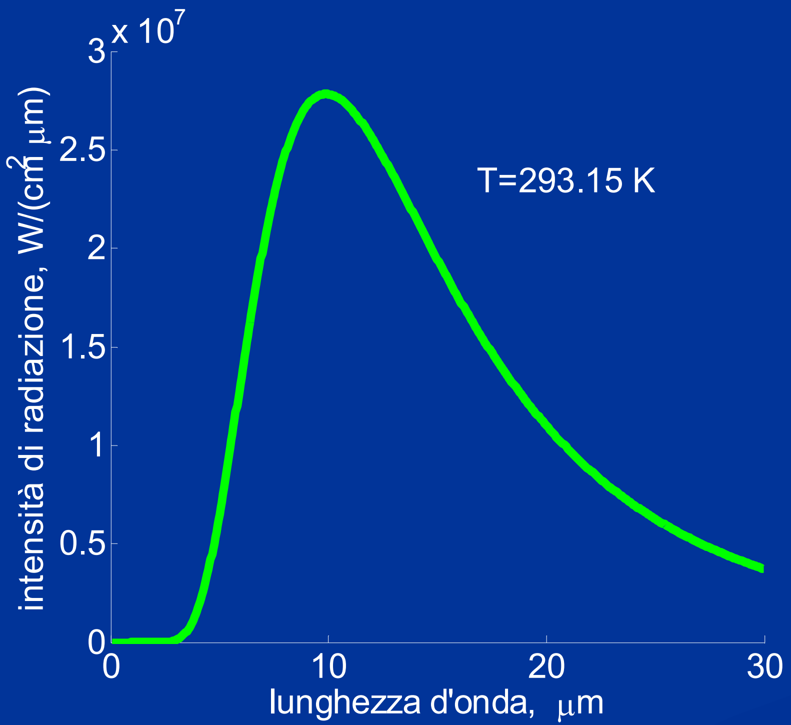
$$\boxed{\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}=0}$$

In coordinate cilindriche

$$\boxed{\frac{\partial T}{\partial t}=\alpha\cdot\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)}$$

Cosa rileva la termografia infrarossa (IR)?

- La termografia infrarossa rileva la radiazione emessa, riflessa e trasmessa da un corpo nella banda spettrale di sensibilità del sensore (IRRAGGIAMENTO)
- Radiazione di corpo nero ideale (equazione di Planck)



$$I_\lambda(T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k \cdot T}} - 1}$$

$h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ J·s costante di Planck

$k = 1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K costante di Boltzmann

Legge di Stefan-Boltzmann

- La legge di Stefan-Boltzmann descrive l'andamento della radiazione totale di corpo nero in funzione della temperatura

$$\boxed{I(T) = \int_0^{+\infty} I_\lambda(\lambda, T)\, d\lambda = \frac{2 \cdot \pi^5 \cdot k^4 \cdot T^4}{15 \cdot c^2 \cdot h^3} = \sigma \cdot T^4}$$

Esempio: una persona alta 180 cm che pesa 80 kg ha una superficie corporea *A* di circa 2 m^2. Se consideriamo il corpo umano un corpo nero ideale alla temperatura T_p=33 °C (306.15 K) posto in una stanza a T_s=20 °C (293.15 K), il flusso netto sarà dato da

$$P_{netta} = P_{emessa} - P_{assorbita} = A \cdot \sigma \cdot \left(T_p^4 - T_s^4\right) \approx 160 \text{ W}$$

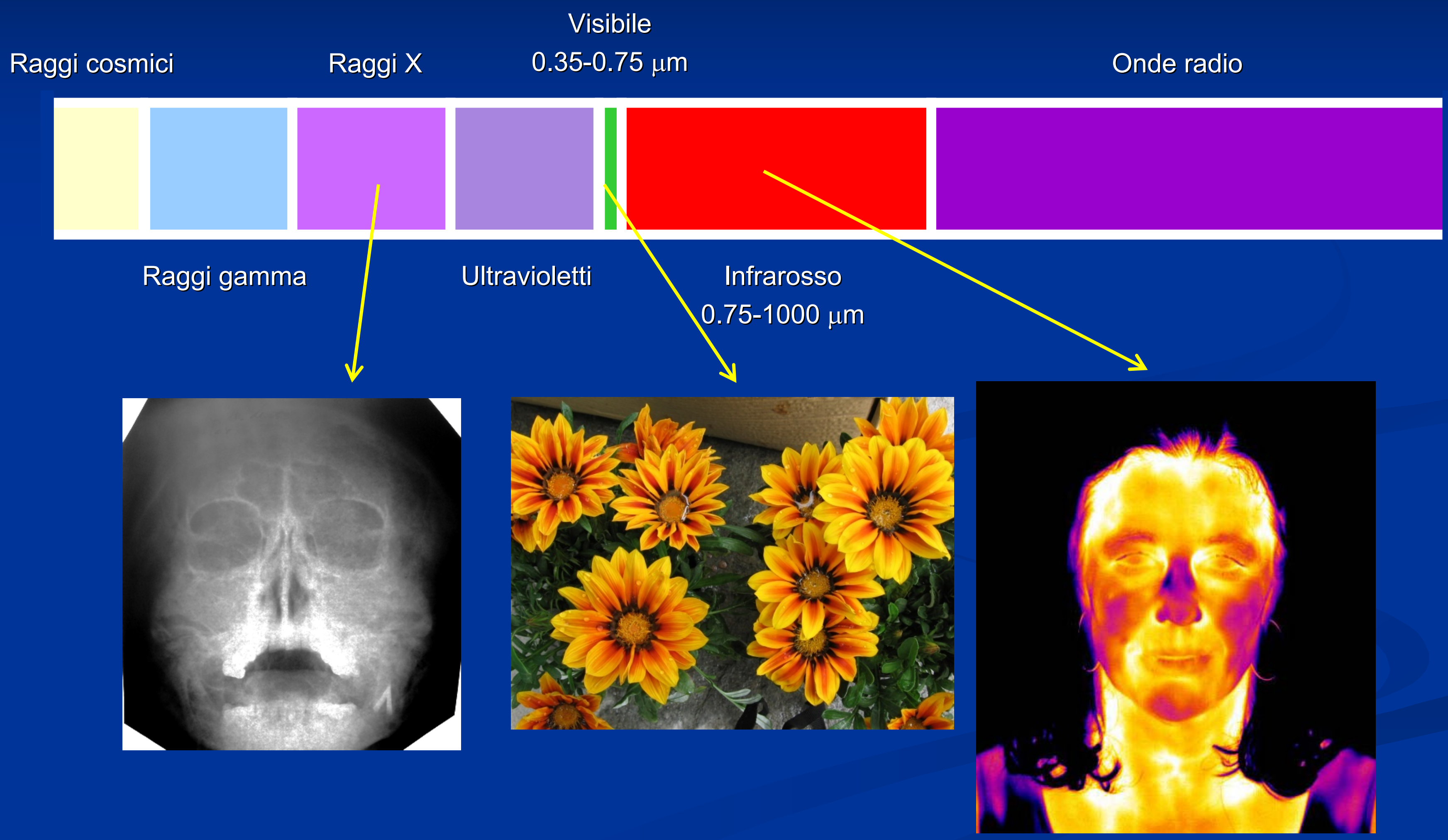
Legge di Wien

- La legge di Wien fornisce la lunghezza d'onda corrispondente al picco della curva di Planck

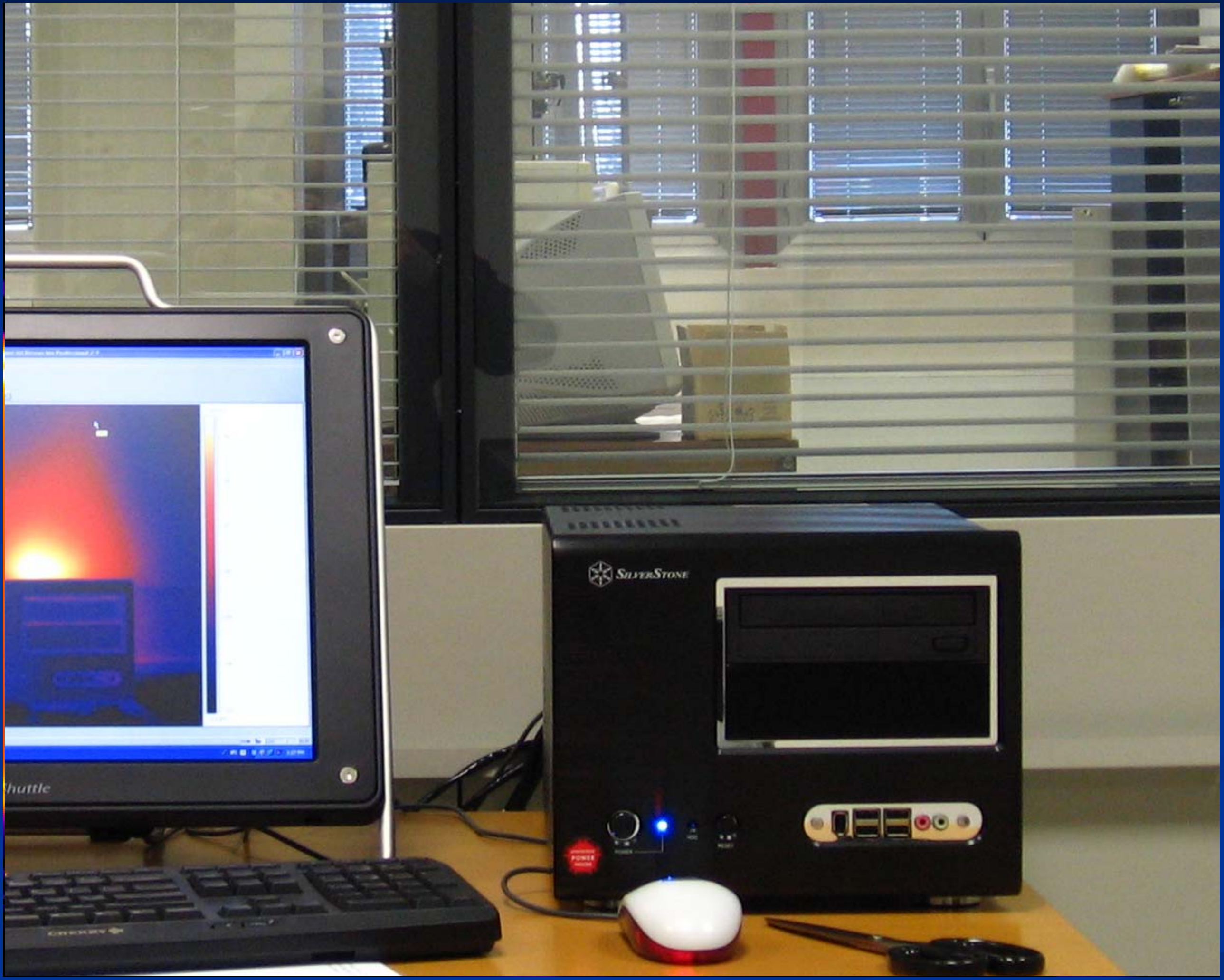
$$\boxed{\frac{\partial I_\lambda(\lambda,T)}{\partial\lambda}=0 \quad \Rightarrow \lambda_{max}=\frac{2898}{T} \quad [\mu m]}$$

Esempio: a temperatura ambiente (T=300 K) λ_{max}=9.7 μm. Il sole è un corpo nero ad una temperatura di circa 5800 K. Applicando la legge di Wien, λ_{max}=0.5 μm che corrisponde ad una lunghezza d'onda percepibile dall'occhio umano.

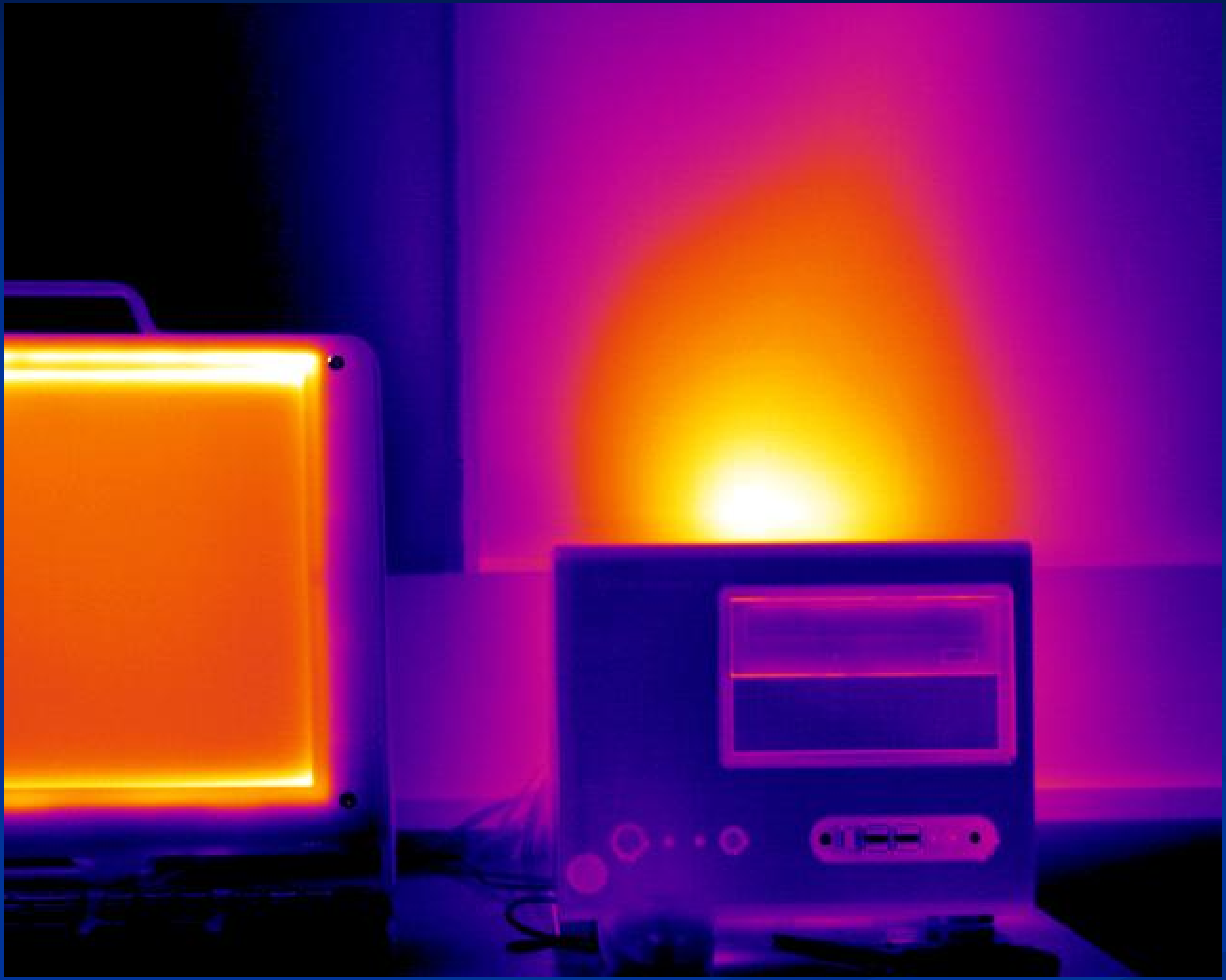
Lo spettro elettromagnetico



La trasparenza del vetro nel visibile



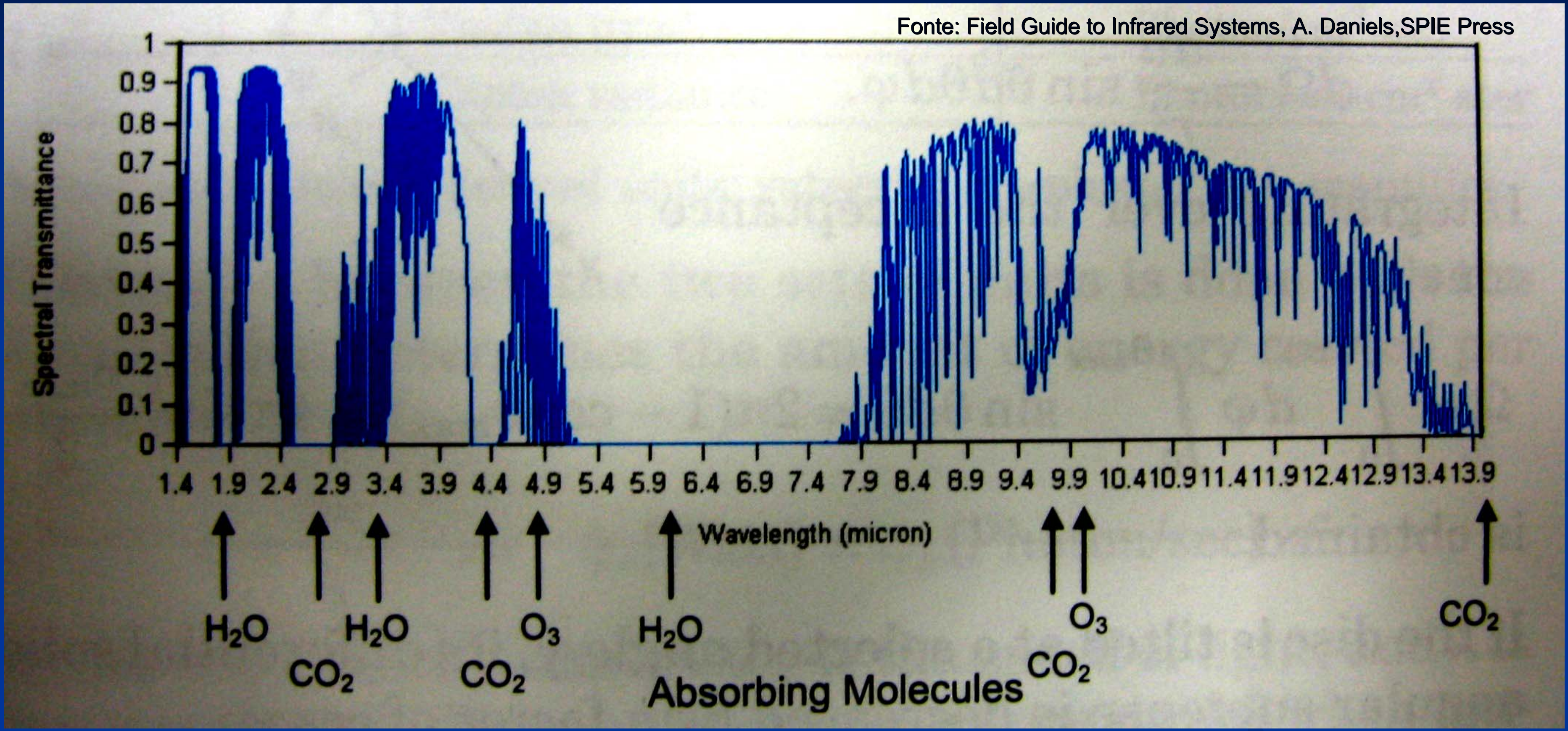
L’opacità del vetro nell’infrarosso



L’opacita del polietilene nel visibile

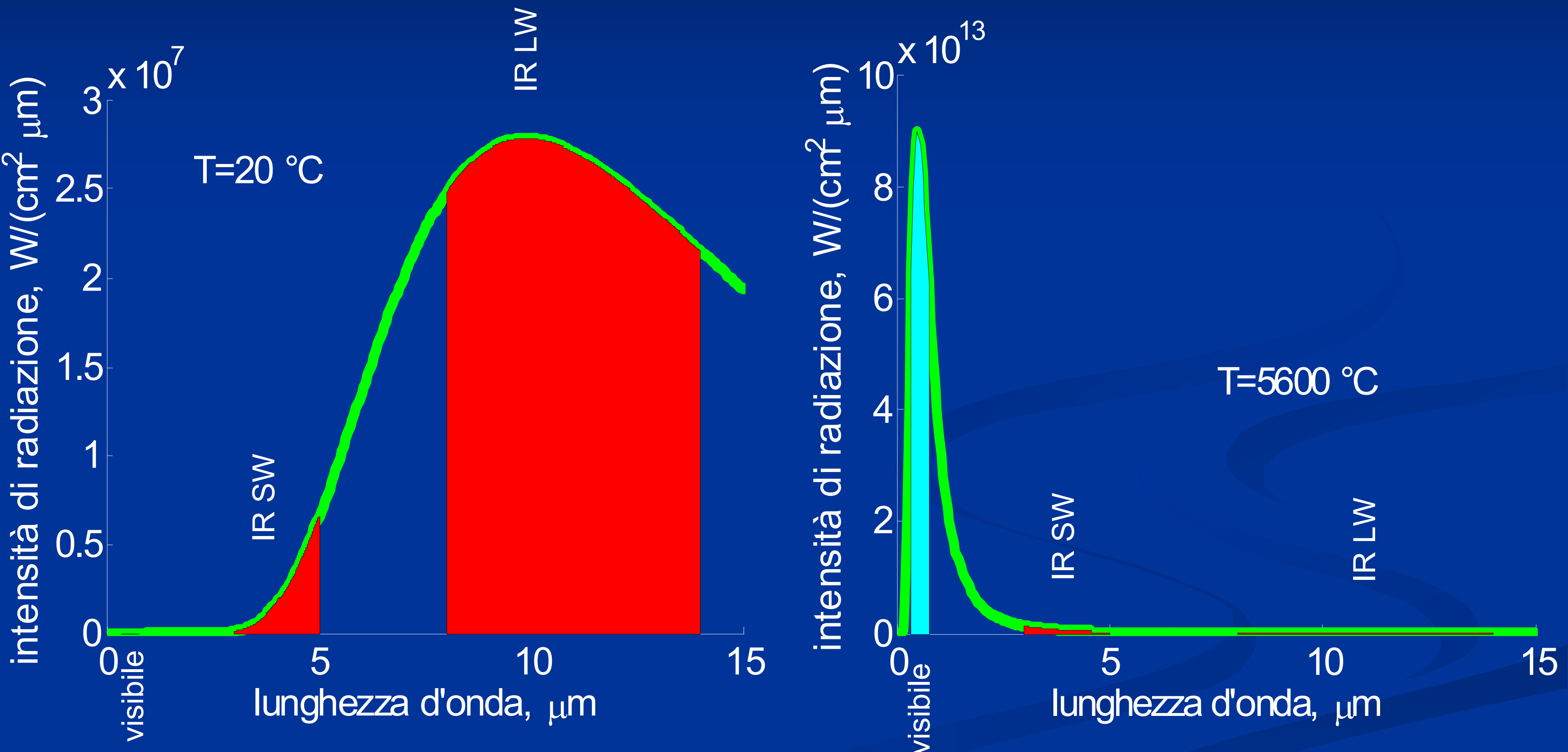
La trasparenza del polietilene nell'infrarosso

Bande IR utilizzate



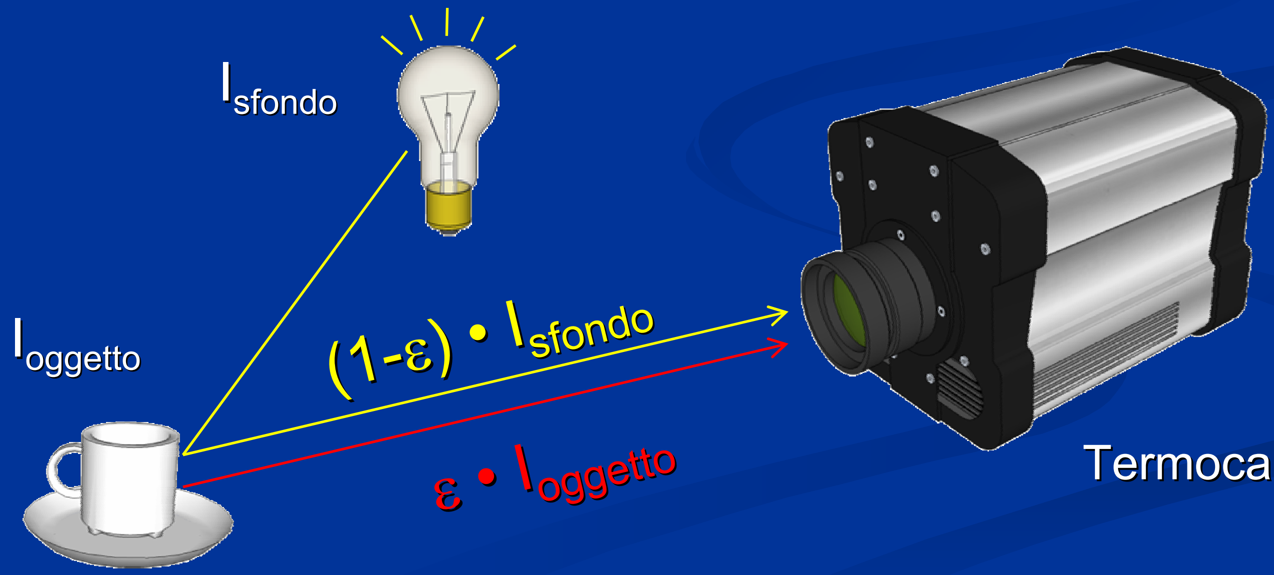
Le bande tipicamente utilizzate per la termografia infrarossa sono 3-5 μm (Short Wave) e 8-14 μm (Long Wave)

Radiazione emessa da un corpo caldo

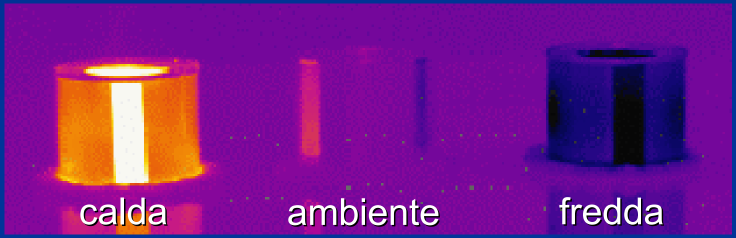


Emissività

- L'emissività ε (≤ 1) di un materiale è il rapporto tra la radiazione emessa da quel materiale e la radiazione emessa da un corpo nero alla stessa temperatura
- L'emissività è una misura della proprietà di un materiale di emettere (e quindi riflettere) la radiazione assorbita



La termografia IR non rileva la temperatura dei corpi …



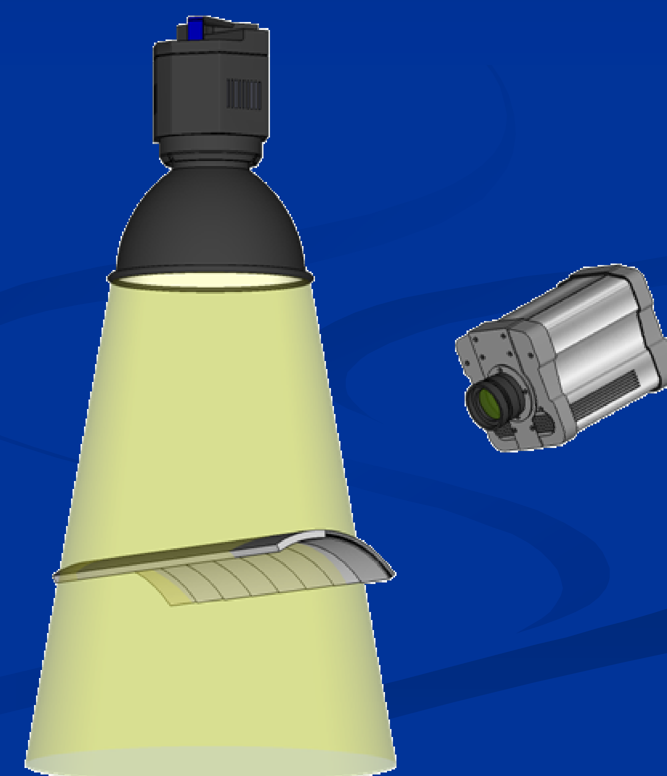
http://www.infraredtraining.com/ir_primer.asp

… ma consente sotto opportune ipotesi di convertire in temperatura la radiazione rilevata.

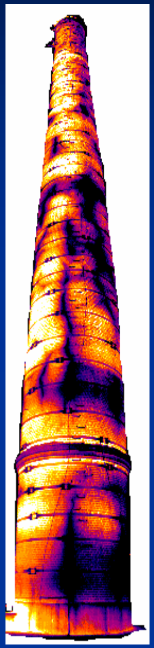
Termografia passiva e attiva

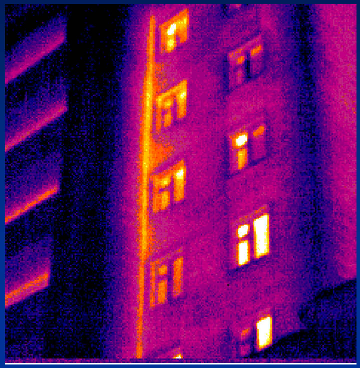
- Nella termografia **passiva** la termocamera viene puntata verso la scena di interesse e non viene applicato nessuno stimolo termico

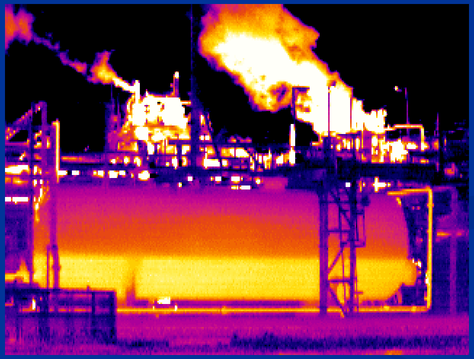
- Nella termografia **attiva** si applica uno stimolo esterno al fine di produrre un transitorio termico

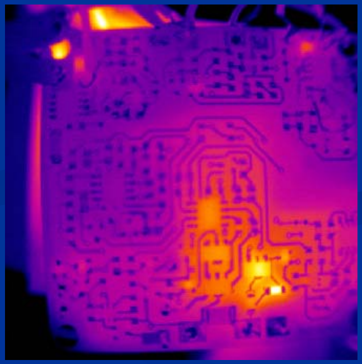


Applicazioni della termografia passiva



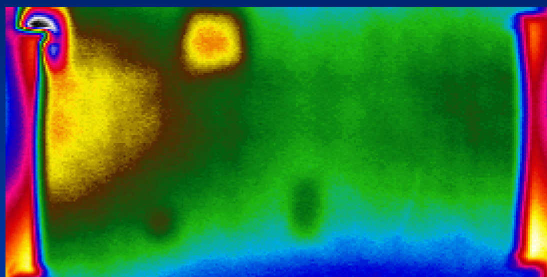


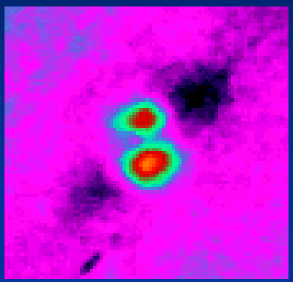


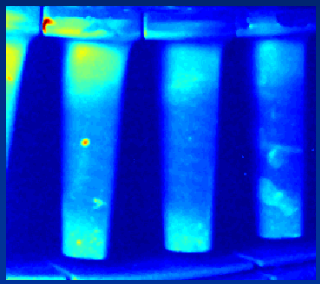


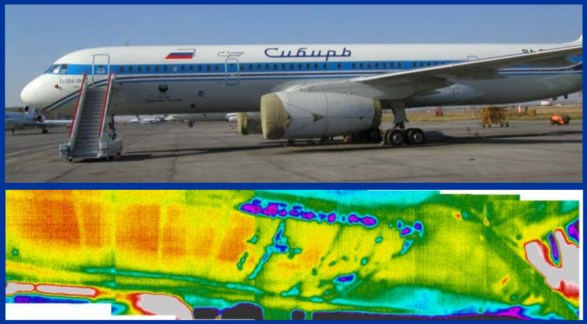
Fonte: Prof. V. Vavilov, Tomsk Polytechnic University (Russia)

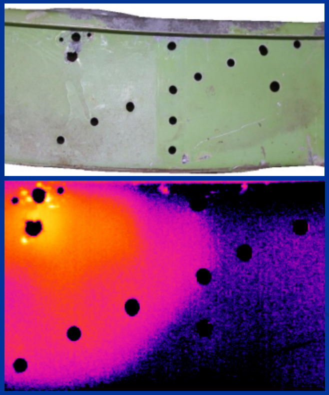
Applicazioni della termografia attiva





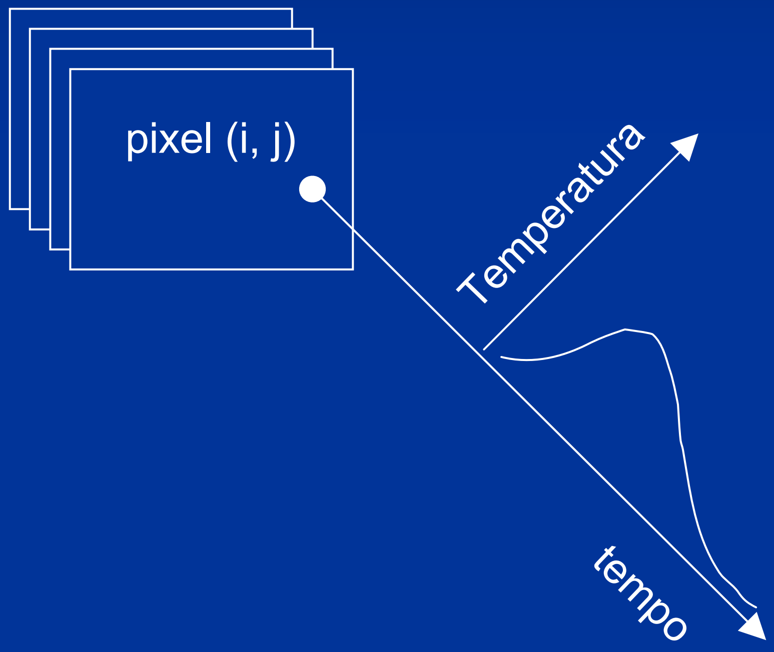






Fonti: Prof. V. Vavilov, Tomsk Polytechnic University (Russia)

Sequenze di immagini termografiche



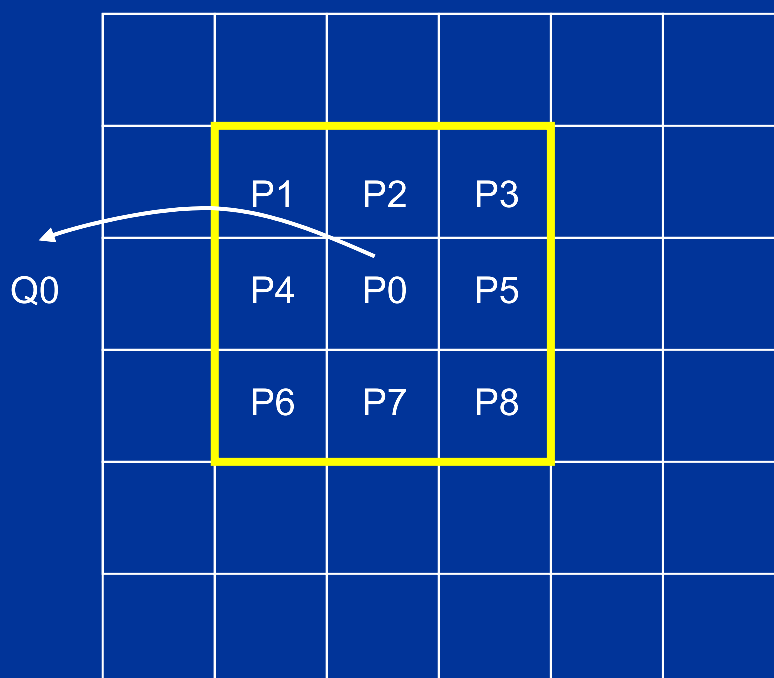
- La termografia attiva fornisce generalmente informazioni di carattere SPAZIO-TEMPORALE
- I dati sono rappresentati in forma di sequenza di immagini IR (termogrammi)
- Tipi di elaborazione:
  - Spazio (filtraggio, equalizzazione, …)
  - Tempo o frequenza (Normalizzazione, Pulse Phase Thermography, Timegram, Apparent Effusivity …)

Elaborazione di immagine

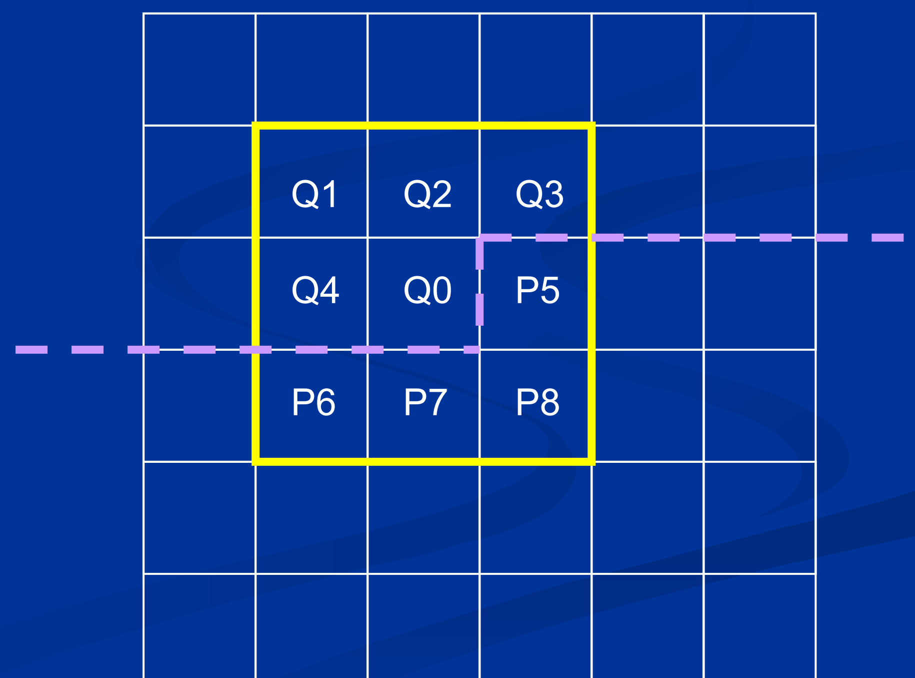
- Le immagini termografiche possono essere trattate con gli algoritmi classici di elaborazione di immagini quali il filtraggio lineare e l'equalizzazione dell'istogramma al fine di migliorarne il rapporto segnale-rumore (SNR) o il contrasto.

Filtraggio lineare

Parallelo (FIR)



Sequenziale (IIR)



Dominio continuo

Detta *f(x,y)* la funzione dei valori grigio del segnale originale e *g(x,y)* la funzione risultante dopo l'applicazione dell'operatore lineare *h(x,y)*, vale la relazione

$$g(x,y) = f(x,y) * h(x,y)$$

dove il simbolo * indica la convoluzione tra le funzioni f e g, cioè

$$\boxed{f(x,y) * h(x,y) = \int_{-\infty}^{+\infty}\int_{-\infty}^{+\infty} f(X,Y) \cdot h(x-X, y-Y)\, dX\, dY}$$

Dominio discreto

Consideriamo ora un dominio discreto corrispondente ad un'immagine di MxN punti e una “finestra” che si estende sulla porzione di dominio composto da IxJ punti in cui h(x,y)≠0. Le variabili x e y diventano coordinate spaziali discrete (m,n) e (i,j)

$$\begin{cases} -I \le i \le I \quad , \quad -J \le j \le J \\ I < m < M\text{-}I \quad , \quad J < n < N\text{-}J \end{cases}$$

Nel caso di finestre quadrate di LxL punti (con L dispari) si ha

$$\mathrm{I} = \mathrm{J} = K = \frac{\mathrm{L} - 1}{2}$$

Nel dominio discreto 2D l'integrale di convoluzione diventa

$$g(m,n) = \sum_{i=-K}^{K} \sum_{j=-K}^{K} f(i,j) \cdot h(m-i, n-j)$$

Filtri FIR

Consideriamo l’equazione lineare alle differenze a coefficienti costanti

$$\sum_{k=0}^{N} a_k y(n-k) = \sum_{r=0}^{M} b_r x(n-r)$$

La somma di convoluzione

$$y(n) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} h(k) x(n-k) = h(n) * x(n)$$

Se N=0

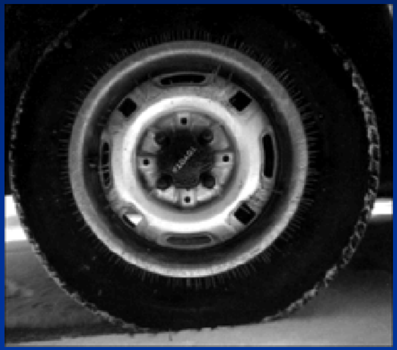
$$y(n) = \frac{1}{a_0} \sum_{r=0}^{M} b_r x(n-r) \qquad (1)$$

Si ha un sistema FIR (a risposta impulsiva finita) in quanto la (1) corrisponde alla somma di convoluzione con

$$h(n) = \begin{cases} \dfrac{b_n}{a_0}, & \mathrm{n} = 0,1,\ldots,\mathrm{M} \\ 0, & \text{altrove} \end{cases}$$

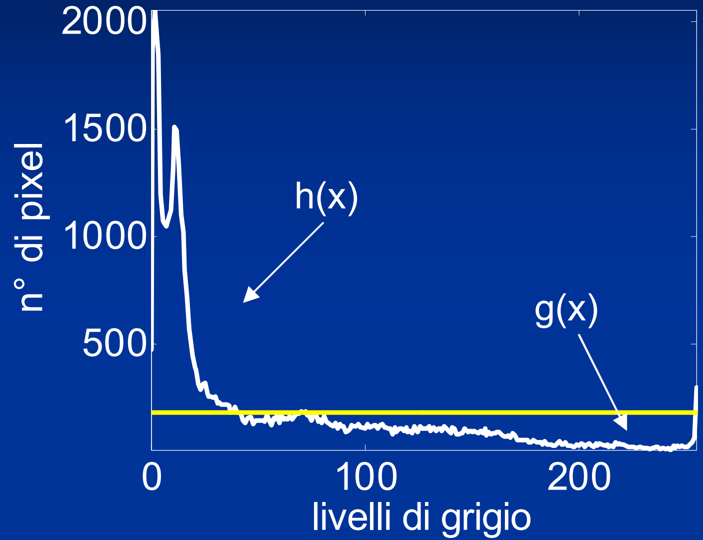
Equalizzazione dell'istogramma

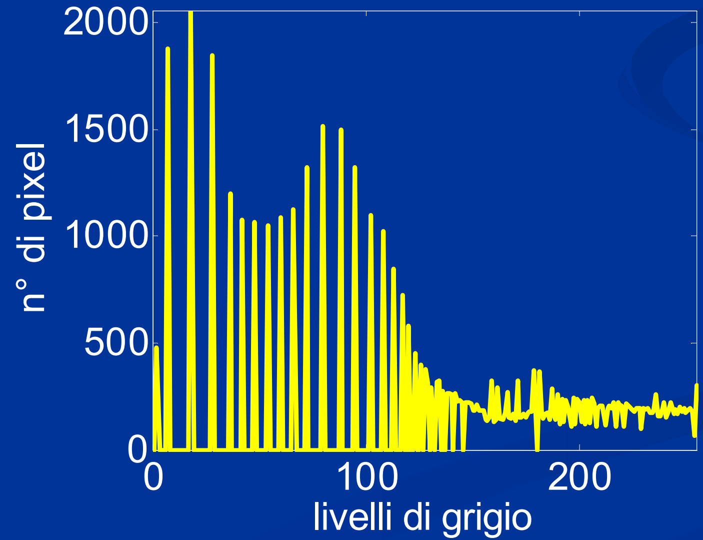
L'istogramma di un'immagine è una funzione *h(x)* che associa ad ogni livello di grigio *x* il numero di pixel aventi quel livello di grigio.



M x N (205 x 232)

256 livelli di grigio (8 bit)





L'equalizzazione deve portare ad una distribuzione costante g(x)=C. Se si impone che le aree elementari h(x)·dx corrispondano ad aree elementari g(y) · dy e quindi C · dy con C=(M · N)/256 si ha:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{1}{C} \cdot h(x)$$

da cui

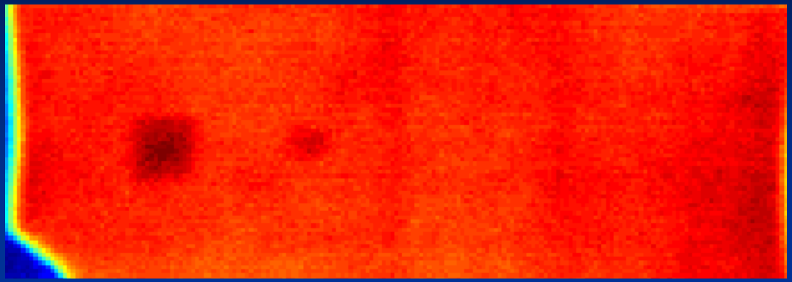
$$y(x) = \frac{1}{C} \int_0^x h(x) \cdot dx$$

Quindi nel "discreto" si ha:

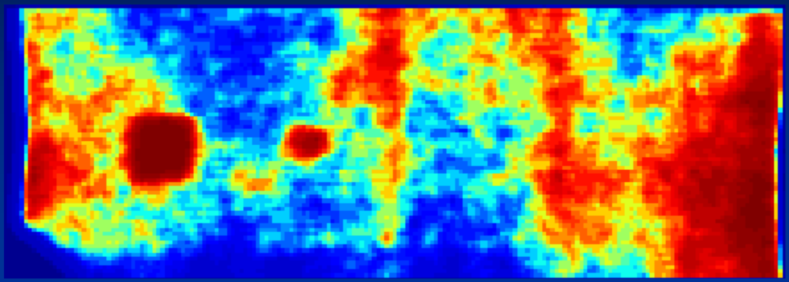
$$\boxed{Y(X) = \frac{256}{M \cdot N} \sum_{i=0}^{X} h(i)}$$

dove Y è il nuovo livello di grigio corrispondente a X.

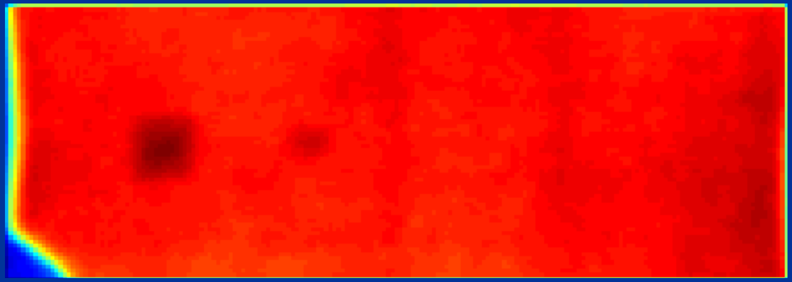
Esempio di elaborazione di immagine



Originale



Equalizzazione



Filtro “media” 3x3

- Diversamente dalle immagini nella banda del visibile, i termogrammi possono fornire informazioni sulla struttura interna del provino in esame (ad esempio sulla presenza di difetti interni quali inclusioni di materiale diverso o variazioni di spessore)

Elaborazione nel tempo

- L'immagine a temperatura ambiente viene sottratta a tutte le immagini della sequenza al fine di analizzare l'evoluzione temporale delle **variazioni di temperatura** di ogni singolo pixel (o gruppi di pixel omogenei).
- I profili di temperatura superficiale corrispondenti a zone sane del campione vengono indicati con **$T_s(t)$**, mentre quelli corrispondenti a zone con difetti vengono indicati con **$T_d(t)$**
- I **segnali** comunemente utilizzati nei test termici non distruttivi sono:

Differenza di temperatura

$$\Delta T(t) = T_d(t) - T_s(t)$$

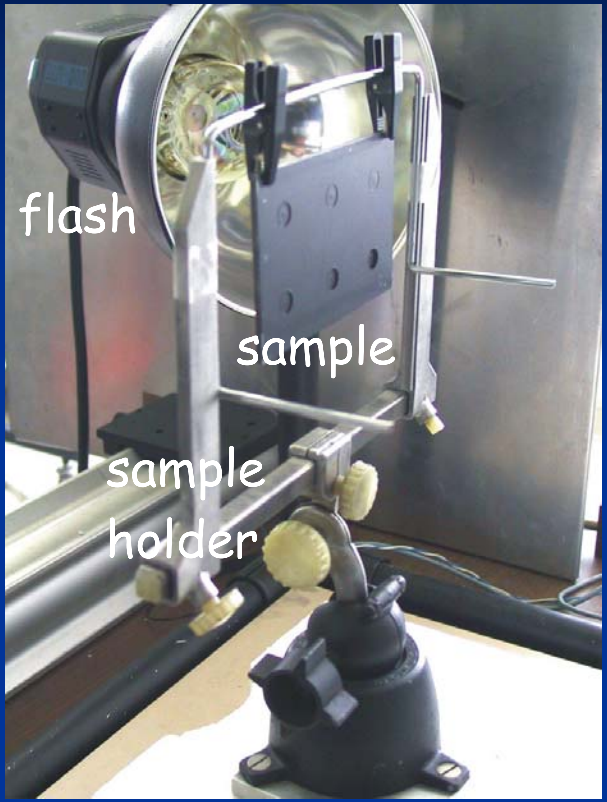
Contrasto normalizzato

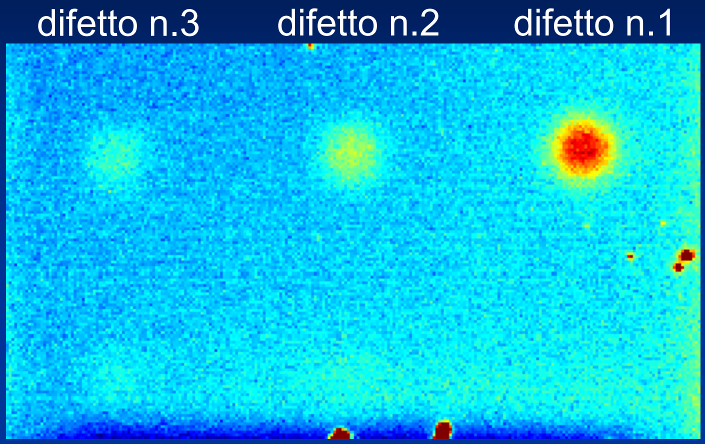
$$C_n(t) = \frac{T_d(t)}{T_d^{max}} - \frac{T_s(t)}{T_s^{max}}$$

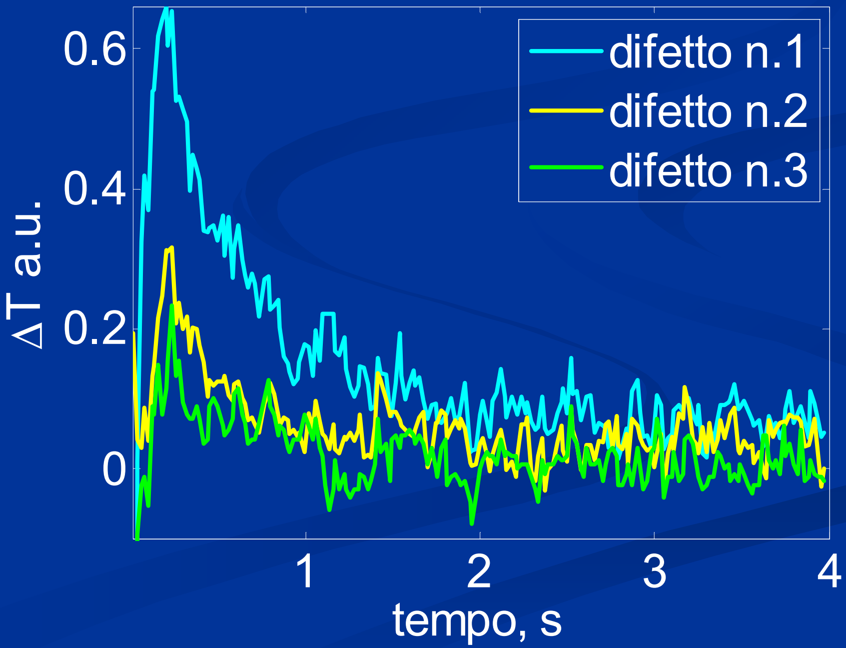
Contrasto "*running*"

$$C_r(t) = \frac{T_d(t) - T_s(t)}{T_s(t)} = \frac{\Delta T(t)}{T_s(t)}$$

Esempio


flash
sample
sample holder

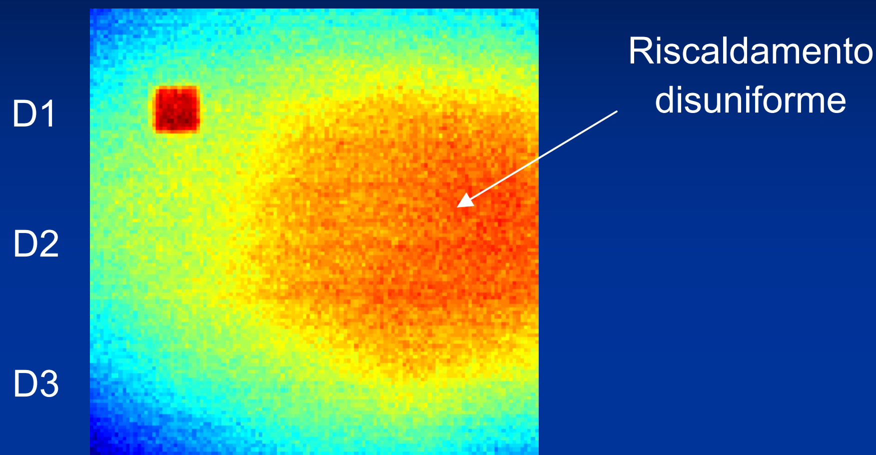

difetto n.3
difetto n.2
difetto n.1

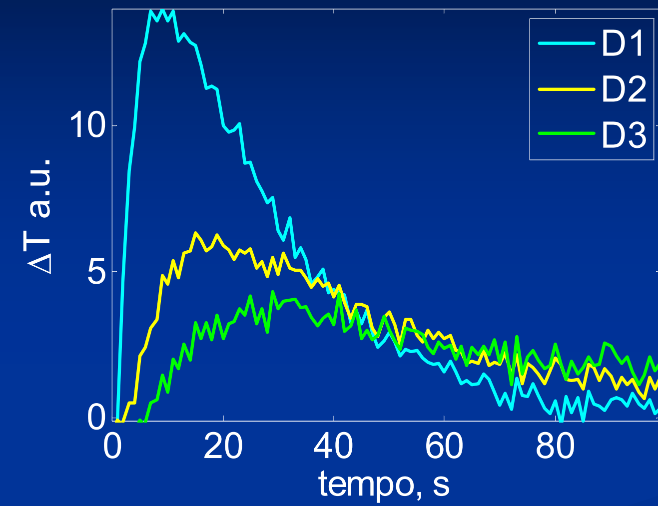

0.6
0.4
0.2
0
ΔT a.u.
1
2
3
4
tempo, s
difetto n.1
difetto n.2
difetto n.3

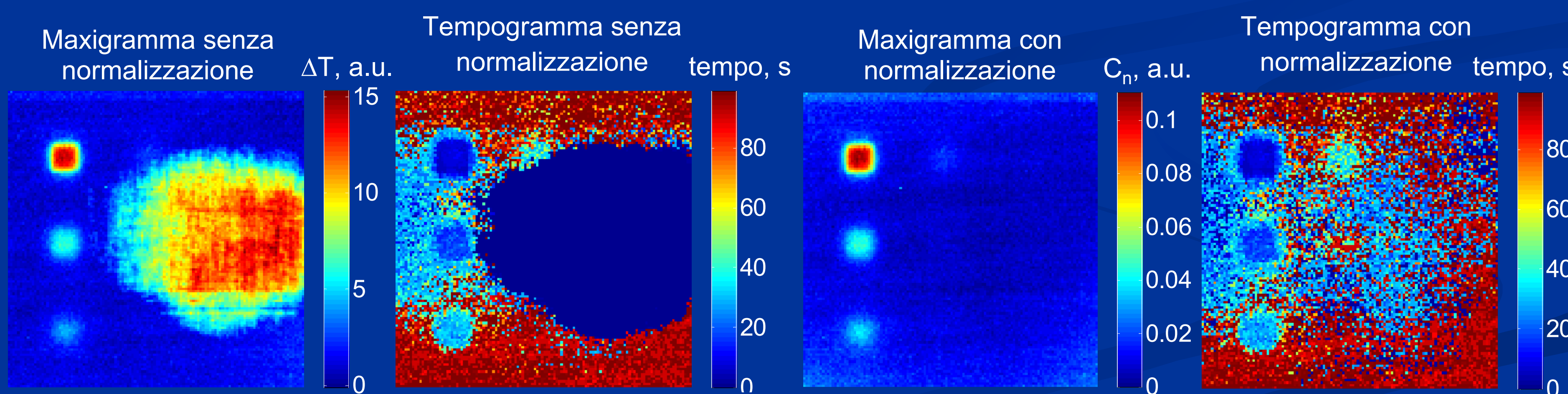
Maxigramma & Tempogramma

- L'evoluzione nel tempo del segnale termico è caratterizzata dalla presenza di un massimo
- Il **valore** di tale massimo e il **tempo** al quale si verifica sono due parametri legati alla dimensione e alla profondità di un difetto
- Il **maxigramma MG** è un'immagine sintetica in cui ogni singolo pixel (i,j) assume il valore massimo del parametro scelto come segnale "informativo" (ΔT, C_r, C_n, …): $\mathbf{MG(i,j)=C_{max}(i,j)}$
- Il **tempogramma TG** è l'immagine sintetica in cui ogni pixel assume il valore dell'istante in cui lo stesso parametro ha raggiunto il suo valore massimo: $\mathbf{TG(i,j)=t_{max}}$

Esempio


D1
D2
D3
Riscaldamento
disuniforme


D1
D2
D3
ΔT a.u.
0
5
10
0
20
40
60
80
tempo, s


Maxigramma senza
normalizzazione
ΔT, a.u.
15
10
5
0
Tempogramma senza
normalizzazione
tempo, s
80
60
40
20
0
Maxigramma con
normalizzazione
C_n, a.u.
0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
0
Tempogramma con
normalizzazione
tempo, s
80
60
40
20
0