

Termistori

I PRT sono sonde termometriche molto stabili ma hanno una **SENSIBILITA' ASSOLUTA** piuttosto bassa

La variazione di resistenza di un PRT è pari a circa il **0.4%** per °C di variazione di temperatura (a 0°C)

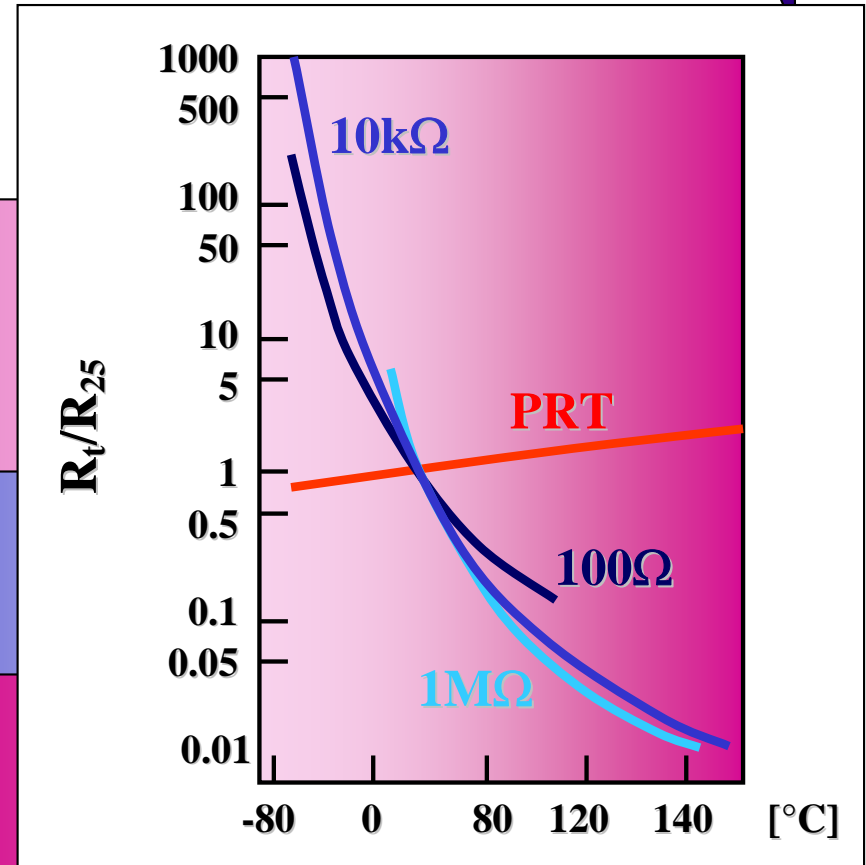
THERMally sensitive resISTOR

i termistori, invece, hanno una **SENSIBILITA' ASSOLUTA** molto più elevata

La variazione di resistenza di un termistore è pari a circa il **4%** per 1°C di variazione di temperatura

i termistori hanno caratteristica **NON LINEARE**, estremamente dipendente dal processo di produzione

per questo non esiste per i termistori la stessa elevata standardizzazione che hanno PRT e termocoppie (dispersione delle caratteristiche molto elevata)



Termistori/2

THERMally sensitive resISTOR

NTC

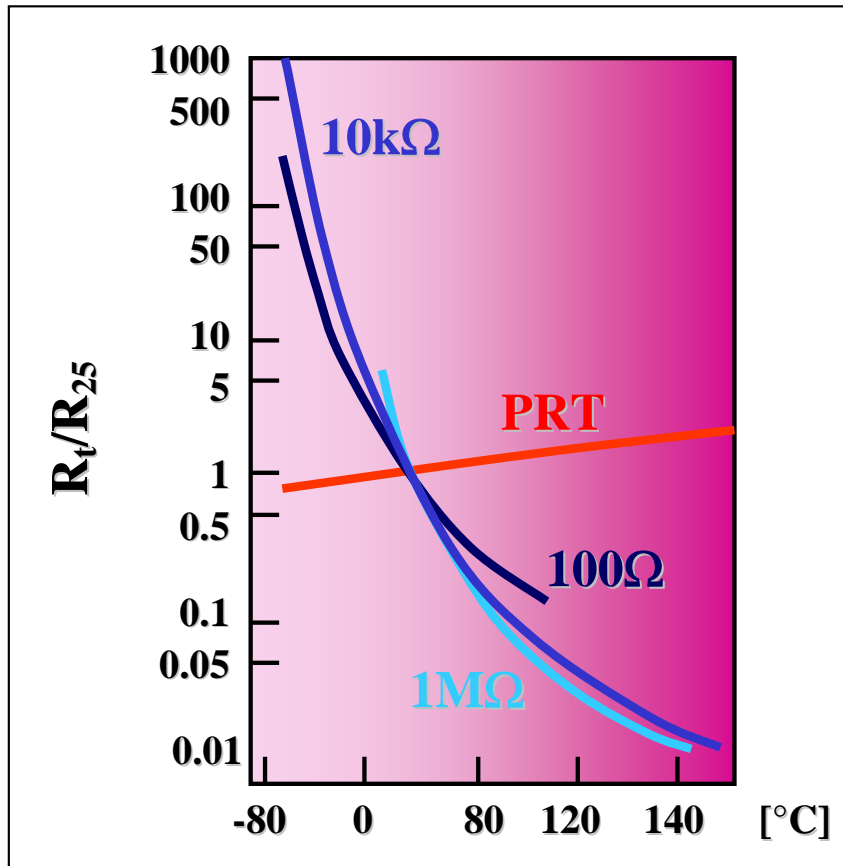
Negative Temperature Coefficient

si usano per misure di temperatura

PTC

Positive Temperature Coefficient

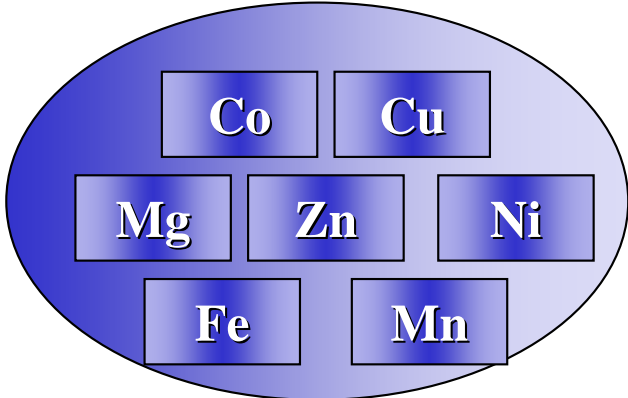
si usano come protezione da sovraccarichi elettrici e da sovratemperature



Termistori/3

NTC

i termistori sono ottenuti mediante sinterizzazione di miscele di ossidi di metalli di transizione con materiale ceramico come legante



le diverse caratteristiche dei resistori (resistività e sensibilità) sono ottenute scegliendo la natura degli ossidi da miscelare, le concentrazioni degli ossidi, le dimensioni geometriche e la configurazione del termistore

quando alcuni atomi del metallo costituente l'ossido vengono sostituiti con atomi di un altro metallo avente diversa valenza

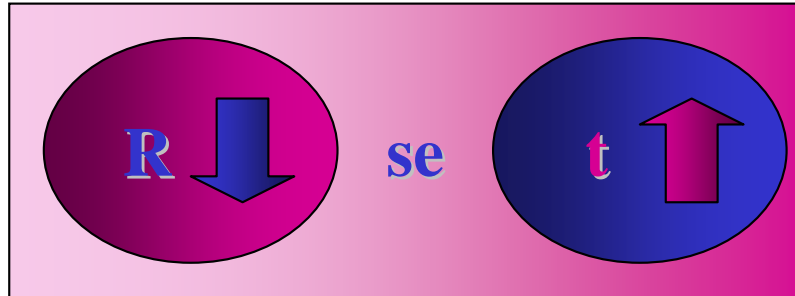
le lacune o gli elettroni liberi che vengono a crearsi localmente dove è avvenuta la sostituzione possono spostarsi sotto l'azione di un campo elettrico con una resistenza al moto tanto più debole quanto più elevata è la temperatura



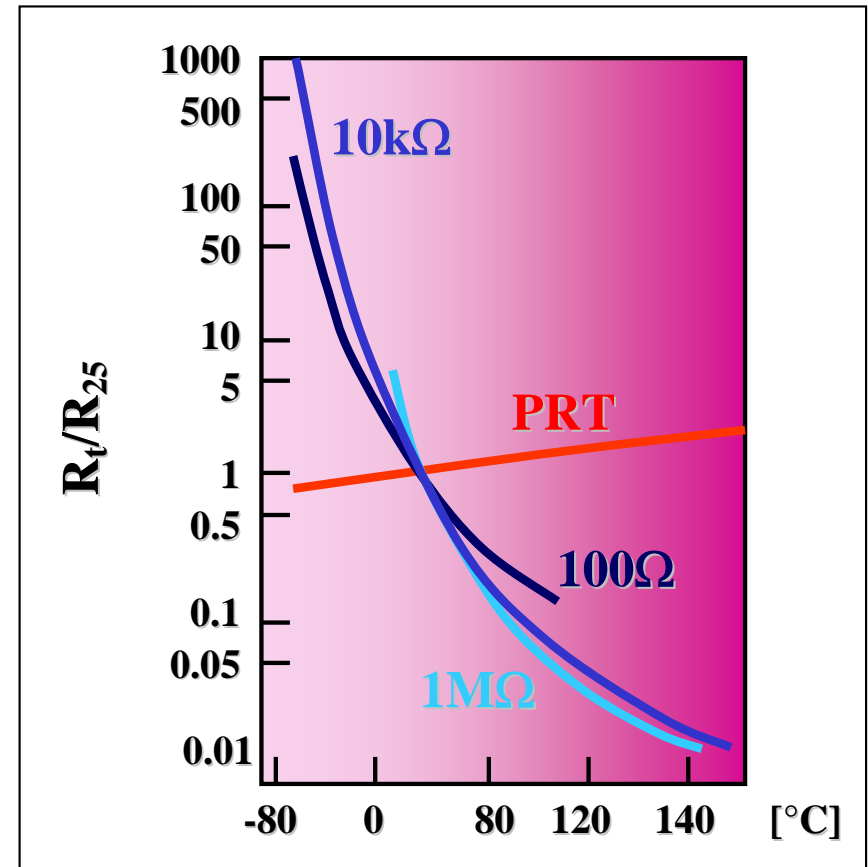
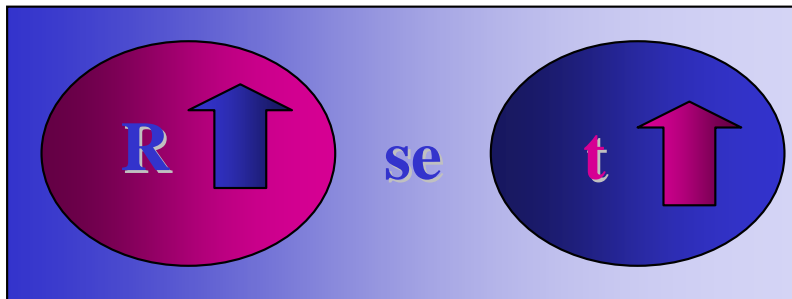
Termistori/4

termistori

NTC



termoresistenze



in un metallo puro, se t cresce, crescono l'ampiezza e la frequenza delle vibrazioni del reticolo cristallino e quindi cala il libero cammino medio, quindi cresce la resistenza al moto degli elettroni e quindi cresce la resistenza elettrica

Termistori/5

NTC

almeno in prima approssimazione la caratteristica che lega temperatura e resistenza per i termistori è del tipo:

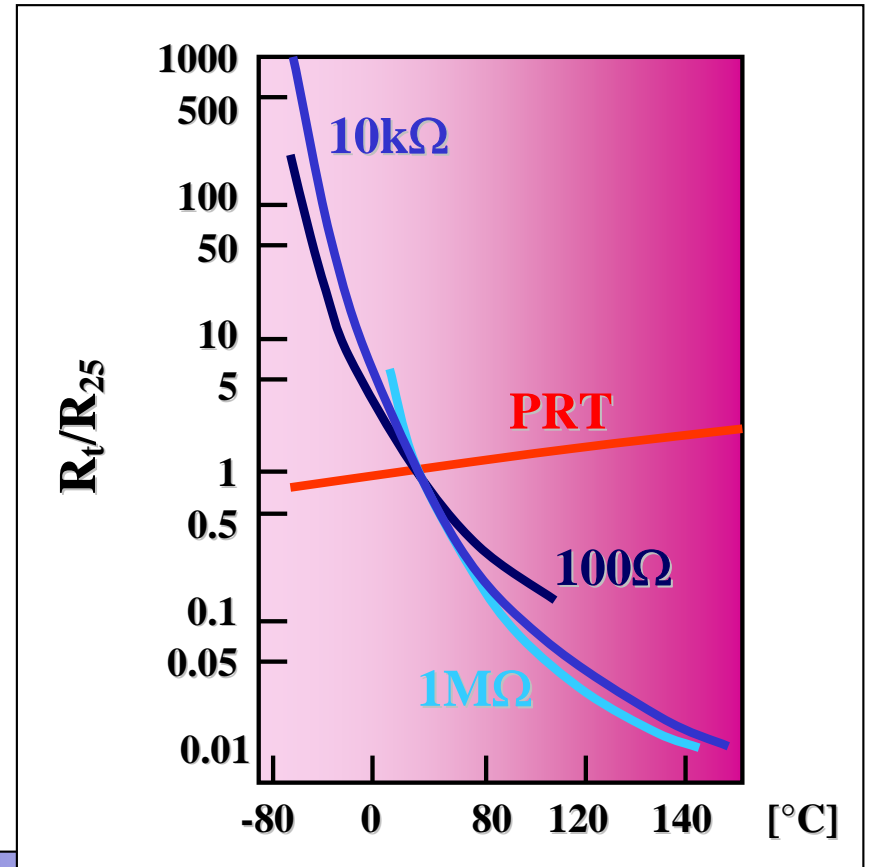
$$\frac{R_1}{R_2} = e^{\beta \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right)}$$

- R_1 è la resistenza elettrica alla temperatura assoluta T_1
- R_2 è la resistenza elettrica alla temperatura assoluta T_2
- β è una caratteristica dei materiali usati per il termistore [K]

normalmente β si determina misurando la resistenza elettrica alle temperature di 298 e 348 K

$$\beta = \frac{T_1 T_2}{T_1 - T_2} \ln \left(\frac{R_1}{R_2} \right)$$

$$\beta_{25/75} = 3000 \div 5000 \text{ [K]}$$



Termistori/6

NTC

COEFFICIENTE TERMICO
della resistenza
elettrica:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$$

rappresenta la variazione
percentuale della resistenza per
una variazione unitaria della
temperatura

$$\alpha \left[\frac{\%}{K} \right] @ 25^{\circ}C$$

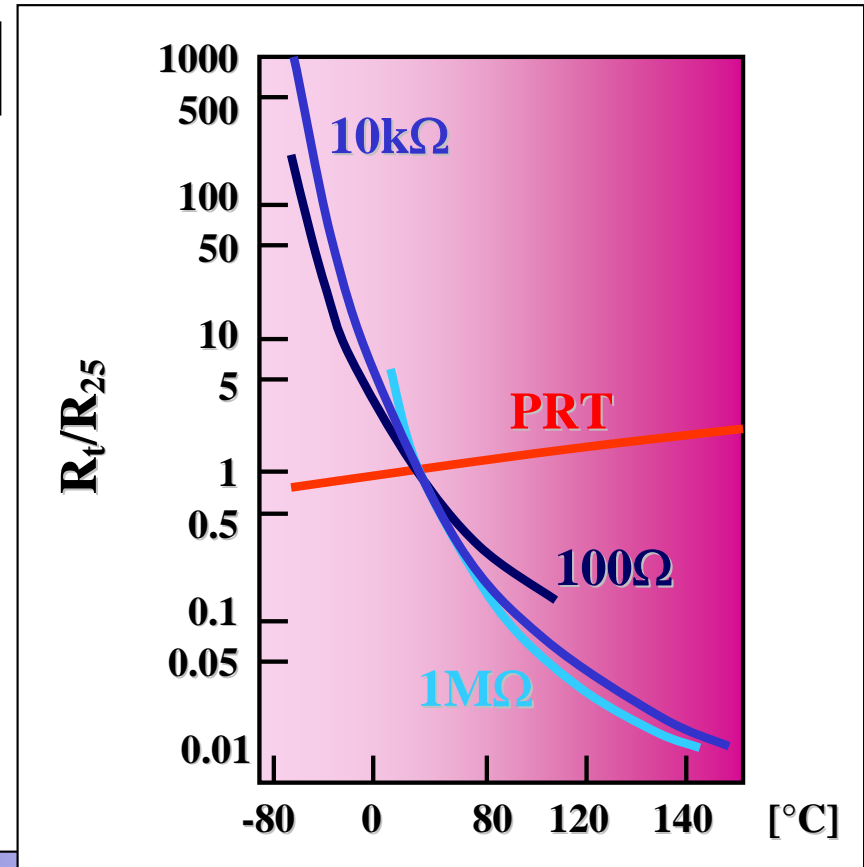
poiché la caratteristica temperatura-resistenza dei termistori non è lineare, anche α non è lineare, e diminuisce all'aumentare della temperatura

per i termistori, tipicamente, è:

$$-6 < \alpha < -3 \frac{\%}{K}$$

per il platino, invece:

$$\alpha = 0.36 \frac{\%}{K}$$



Termocoppie

termocoppie

trasmissione a distanza

registrazione delle misure

incertezza TC > PRT

prontezza TC > PRT

sensibilità TC > PRT

ingombro TC < PRT

in una parola
sono le sonde
termometriche
più
VERSATILI

si basano sull'effetto
scoperto nel 1821 da
Thomas Johann Seebeck
usando una coppia rame-
antimonio

**EFFETTO
SEEBECK**

quando due conduttori A e B, diversi tra loro, ma ognuno omogeneo, sono uniti alle estremità e queste sono mantenute a temperatura diversa, nel circuito così realizzato si manifesta una forza elettromotrice E tale che:

$$dE_S = \alpha_{AB} dT$$

α_{AB} → coefficiente di Seebeck, o **POTERE TERMOELETTRICO**

Termocoppie/2

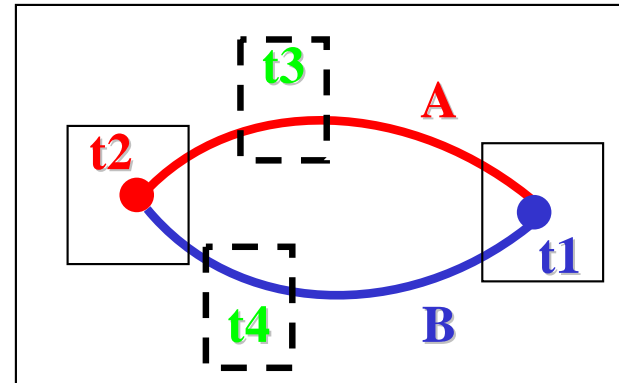
leggi dei circuiti termoelettrici

1 legge del circuito omogeneo

ha origine sperimentale

in un circuito chiuso, di geometria qualunque, costituito da un solo metallo omogeneo, non si può indurre circolazione di corrente elettrica per mezzo soltanto di scambi termici

il circuito di un sensore termoelettrico deve essere costituito da almeno due metalli diversi



se una giunzione tra due materiali diversi omogenei è mantenuta a t_1 e l'altra a t_2 , la f.e.m. generata è indipendente dalla distribuzione di temperatura lungo i fili: cioè non cambia al variare di t_3 e t_4

Termocoppie/3

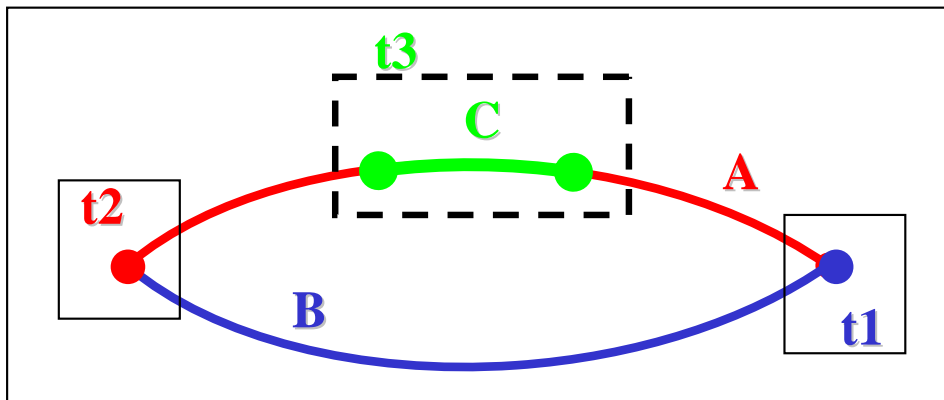
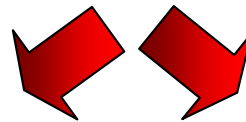
2

legge dei metalli intermedi



è una conseguenza diretta della 2a legge della termodinamica: se infatti la somma algebrica delle f.e.m. non fosse nulla in un circuito isoterma, si avrebbe circolazione di corrente e quindi la temperatura aumenterebbe in alcune parti del circuito e diminuirebbe in altre provocando, senza spesa di lavoro, delle variazioni di temperatura in un sistema isoterma

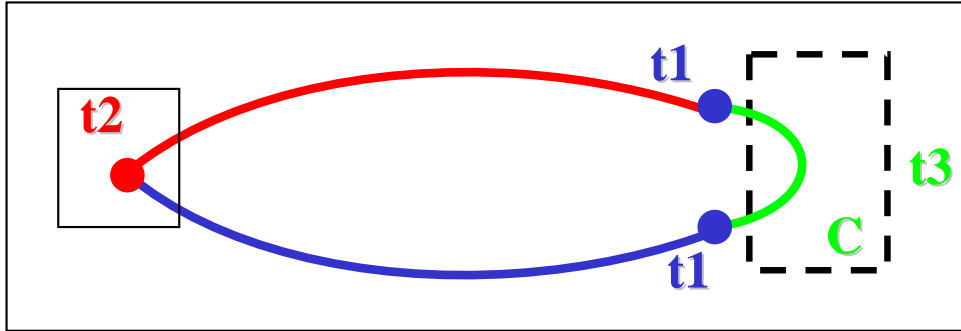
la somma algebrica delle f.e.m. termoelettriche in un circuito composto da un numero qualunque di metalli diversi è nulla se tutto il circuito è isoterma



se in un circuito costituito da due metalli omogenei, A e B, si inserisce un terzo metallo C, non si hanno variazioni di f.e.m. fin tanto che la temperatura t_3 di C è uniforme su tutta la sua lunghezza

Termocoppie/4

applicando le due leggi finora introdotte:



$$E_{AC} + E_{CB} + E_{BA} = 0$$

$$E_{AB} = E_{AC} + E_{CB}$$

se **A** e **B** vengono separati in corrispondenza del giunto a t_1 , mediante l'inserzione di **C** nel circuito, la f.e.m. non varia anche se **C** attraversa una regione a temperatura t_3 , purché i due giunti rimangano a temperatura t_1

uno strumento per la misura della f.e.m. può essere inserito in qualsiasi punto del circuito, purché tutti i nuovi giunti così formati vengano mantenuti alla stessa temperatura

si può usare qualsiasi tecnica per realizzare i giunti, purché essi risultino di dimensioni limitate e quindi facilmente mantenibili a temperatura costante e purché il contatto elettrico tra i materiali così ottenuti sia buono

Termocoppie/5

3

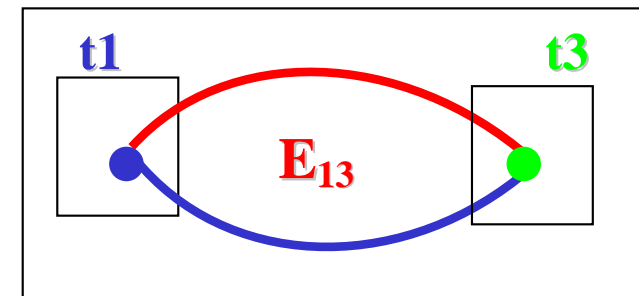
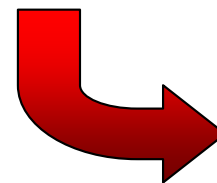
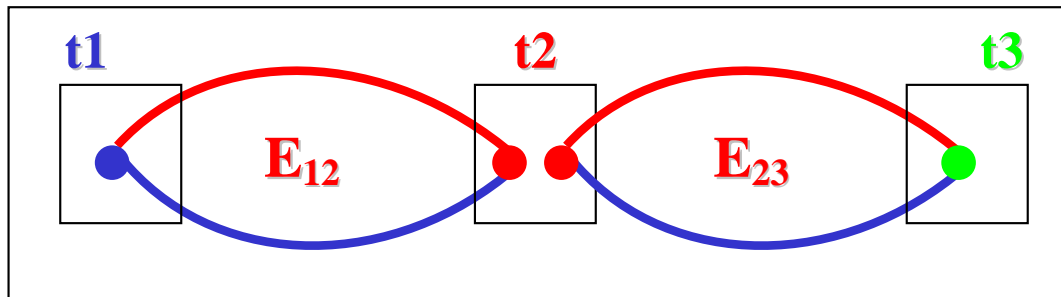
legge delle temperature successive o intermedie



si ricava applicando i principi della termodinamica alla coppia considerata come un sistema reversibile

se due metalli omogenei A e B disposti in un circuito termoelettrico producono una f.e.m. E_{12} qualora le giunzioni si trovino alle temperature t_1 e t_2 ed una f.e.m. E_{23} qualora le giunzioni si trovino alle temperature t_2 e t_3 , allora gli stessi metalli con le giunzioni alle temperature t_1 e t_3 produrranno una f.e.m. pari alla somma algebrica:

$$E_{13} = E_{12} + E_{23}$$

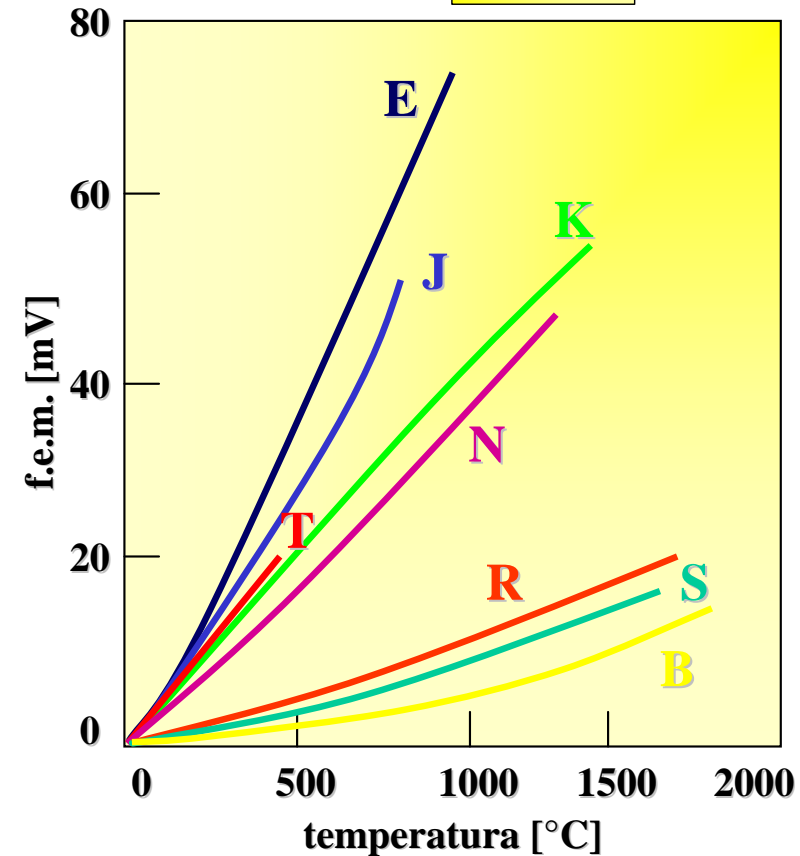


Termocoppie/5

requisiti dei metalli per termocoppie:

$$\alpha = \frac{dE}{dT}$$

- **il POTERE TERMOELETRICO, α , deve presentare lo stesso segno in tutto il campo di temperatura esplorato**
- **la f.e.m. non deve variare con l'uso per fenomeni di ricristallizzazione e stabilizzazione fisica o chimica-fisica: tutti i metalli (e specialmente le leghe) vanno accuratamente stabilizzati con opportuni procedimenti di ricottura**
- **la resistenza all'ossidazione ed alla riduzione deve essere la più grande possibile**



la curva caratteristica f.e.m.-temperatura può essere espressa mediante polinomi del tipo:
in cui A, B, C e D

$$E = A + Bt + Ct^2 + Dt^3$$

sono caratteristici della coppia di metalli e del campo di temperatura, oppure si usano tavole che danno la f.e.m. dei diversi tipi di termocoppie rispetto ad uno stato di riferimento (di solito la temperatura a 0°C)

Termocoppie/6

tipi di termocoppie

●	termocoppie tipo	S	platino (Pt) + platino ₈₇ (Pt), rodio ₁₃ (Rh)	0÷1500°C
●	termocoppie tipo	R	platino (Pt) + platino ₉₀ (Pt), rodio ₁₀ (Rh)	0÷1500°C
●	termocoppie tipo	B	platino ₇₀ (Pt), rodio ₃₀ (Rh) + platino ₉₄ (Pt), rodio ₆ (Rh)	870÷1700°C
●	termocoppie tipo	J	ferro (Fe) + costantana (Ni ₄₅ Cu ₅₅)	-184÷870°C
●	termocoppie tipo	T	rame (Cu) + costantana (Ni ₄₅ Cu ₅₅)	-184÷370°C
●	termocoppie tipo	K	chromel (Ni ₉₀ Cr ₁₀) + alumel (Ni ₉₅ Mn ₂ Al ₂ Si ₁)	0÷1260°C
●	termocoppie tipo	E	chromel (Ni ₉₀ Cr ₁₀) + costantana (Ni ₄₅ Cu ₅₅)	-184÷870°C

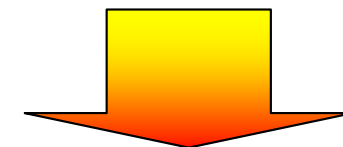
Termocoppie/7

per ogni tipo di termocoppia esistono tabelle che riportano i valori di f.e.m. alle diverse temperature, riferiti a 0°C (UNI-CTI 7938)

Prospetto VII - Relazione $E = f(t)$ per termocoppia tipo T (giunto di riferimento a 0 °C)

Temperatura °C	f.e.m. mV									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
-270	-6,258									
-260	-6,232	-6,236	-6,239	-6,242	-6,245	-6,248	-6,251	-6,253	-6,255	-6,256
-250	-6,181	-6,187	-6,193	-6,198	-6,204	-6,209	-6,214	-6,219	-6,224	-6,228
-240	-6,105	-6,114	-6,122	-6,130	-6,138	-6,146	-6,153	-6,160	-6,167	-6,174
-230	-6,007	-6,018	-6,028	-6,039	-6,049	-6,059	-6,068	-6,078	-6,087	-6,096
-220	-5,889	-5,901	-5,914	-5,928	-5,938	-5,949	-5,959	-5,973	-5,985	-5,996
-210	-5,753	-5,767	-5,782	-5,795	-5,809	-5,823	-5,836	-5,850	-5,863	-5,876
-200	-5,603	-5,619	-5,634	-5,650	-5,665	-5,680	-5,695	-5,710	-5,724	-5,739
0	0,000	-0,039	-0,077	-0,116	-0,154	-0,193	-0,231	-0,269	-0,307	-0,345
0	0,000	0,039	0,078	0,117	0,156	0,195	0,234	0,273	0,312	0,351
10	0,391	0,430	0,470	0,510	0,549	0,589	0,629	0,669	0,709	0,749
20	0,789	0,830	0,870	0,911	0,951	0,992	1,032	1,073	1,114	1,155
30	1,196	1,237	1,279	1,320	1,361	1,403	1,444	1,486	1,528	1,569
40	1,611	1,653	1,695	1,738	1,780	1,822	1,865	1,907	1,950	1,992
50	2,035	2,078	2,121	2,164	2,207	2,250	2,294	2,337	2,380	2,424
60	2,467	2,511	2,555	2,599	2,643	2,687	2,731	2,775	2,819	2,864
70	2,908	2,953	2,997	3,042	3,087	3,131	3,176	3,221	3,266	3,312
80	3,357	3,402	3,447	3,493	3,538	3,584	3,630	3,676	3,721	3,767
90	3,813	3,859	3,906	3,952	3,998	4,044	4,091	4,137	4,184	4,231
100	4,277	4,324	4,371	4,418	4,465	4,512	4,559	4,607	4,654	4,701
110	4,749	4,796	4,844	4,891	4,939	4,987	5,035	5,083	5,131	5,179
120	5,227	5,275	5,324	5,372	5,420	5,469	5,517	5,566	5,615	5,663
130	5,712	5,761	5,810	5,859	5,908	5,957	6,007	6,056	6,105	6,155

i costruttori preparano coppie caratterizzate da proprietà quasi uguali da campione a campione, ma ciò nonostante le differenze riscontrabili nelle indicazioni di temperatura non sono mai trascurabili



se si desidera una precisione maggiore di quella garantita dai costruttori (valori riportati nella tabella) non resta che procedere alla TARATURA di ciascuna coppia

Termocoppie/8

circuiti di misura con termocoppie

la f.e.m. generata da una termocoppia dipende dalla differenza di temperatura tra i due giunti

$$dE_S = \alpha_{AB} dT$$

se si vogliono eseguire misure assolute occorre che uno dei due giunti sia mantenuta ad una temperatura nota con sufficiente precisione

generalmente il giunto di riferimento è mantenuto alla temperatura di fusione del ghiaccio (almeno per le misure di laboratorio)

in un contenitore Dewar si mantiene ghiaccio tritato (ottenuto con acqua distillata) in equilibrio con acqua distillata liquida

incertezza del punto di gelo:

$$\pm 5 \cdot 10^{-3} \text{ K}$$

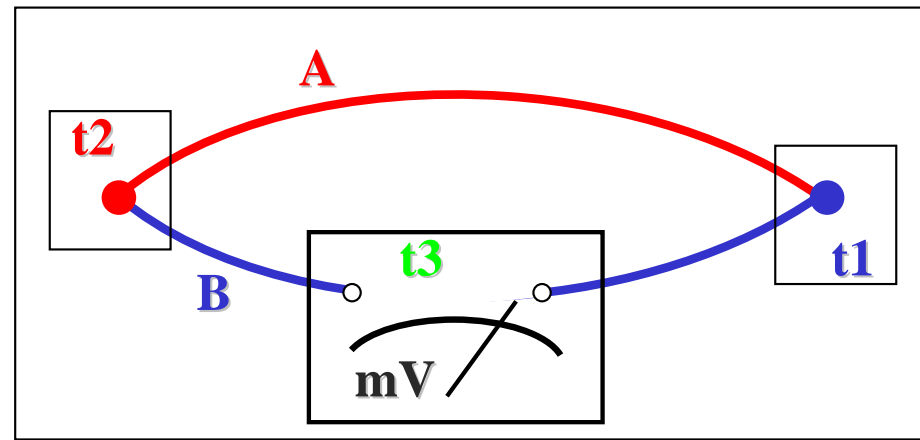
se non si usa acqua distillata

incertezza del punto di gelo:

$$\pm 5 \cdot 10^{-2} \text{ K}$$

Termocoppie/9

per le misure di laboratorio il circuito può essere del tipo:



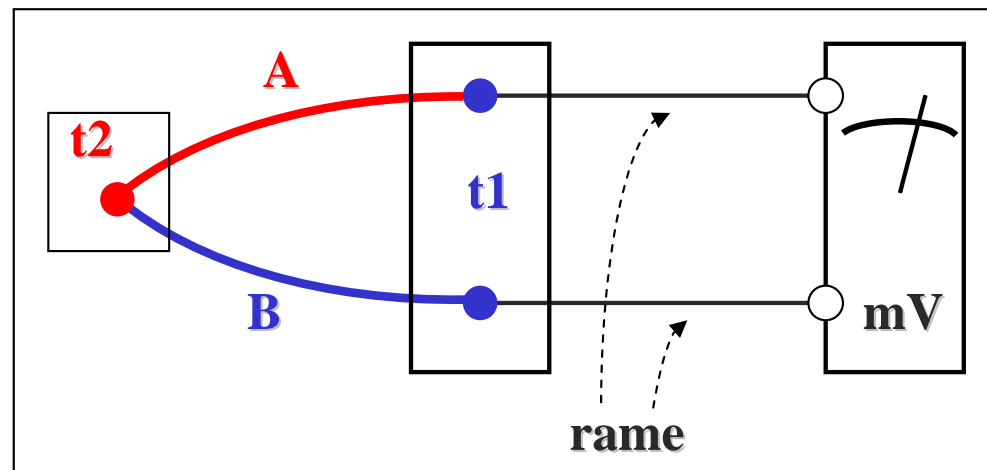
per misure in remoto

distanze elevate tra ambiente di misura e apparato di misura

per misure a temperatura elevata

quando è necessario che i fili siano dotati di elevate caratteristiche di purezza e di conseguenza di costo elevato

si usano i
CAVI DI ESTENSIONE



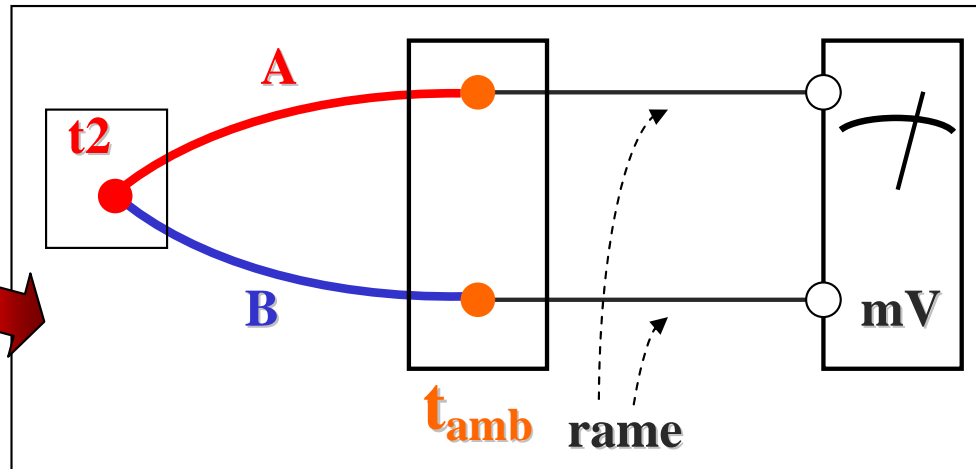
possono essere degli stessi metalli del giunto di misura ma con diametri minori, oppure di metalli differenti,

oppure entrambi dello stesso metallo (RAME)

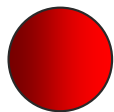
Termocoppie/10

quando non sono necessarie grandi precisioni di misura (ad es. per misure industriali):

il giunto di riferimento è mantenuto in equilibrio con la temperatura ambiente



l'errore che si produce è notevolmente maggiore a causa della instabilità della temperatura del giunto di riferimento



le tavole che riportano la f.e.m., riferite ad una temperatura del giunto freddo di 0°C, sono utili anche quando il giunto di riferimento è a temperatura ambiente:

infatti, dalla legge delle temperature intermedie si ha:



se $t_{amb} > 0^\circ\text{C}$, all f.e.m. misurata deve essere aggiunta algebricamente la f.e.m. corrispondente alla temperatura ambiente

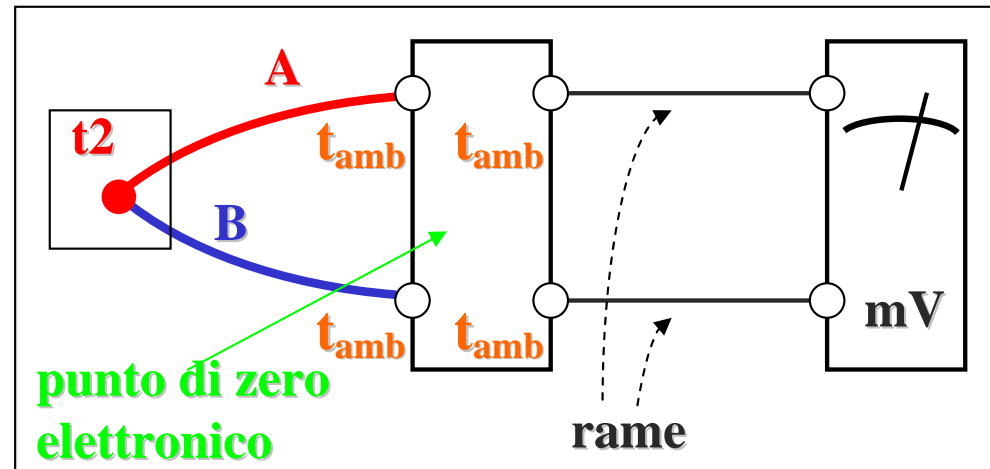
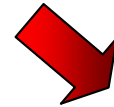


se $t_{amb} < 0^\circ\text{C}$, all f.e.m. misurata deve essere sottratta la f.e.m. corrispondente alla temperatura ambiente

Termocoppie/11

quando non sono necessarie grandi precisioni di misura (ad es. per misure industriali):

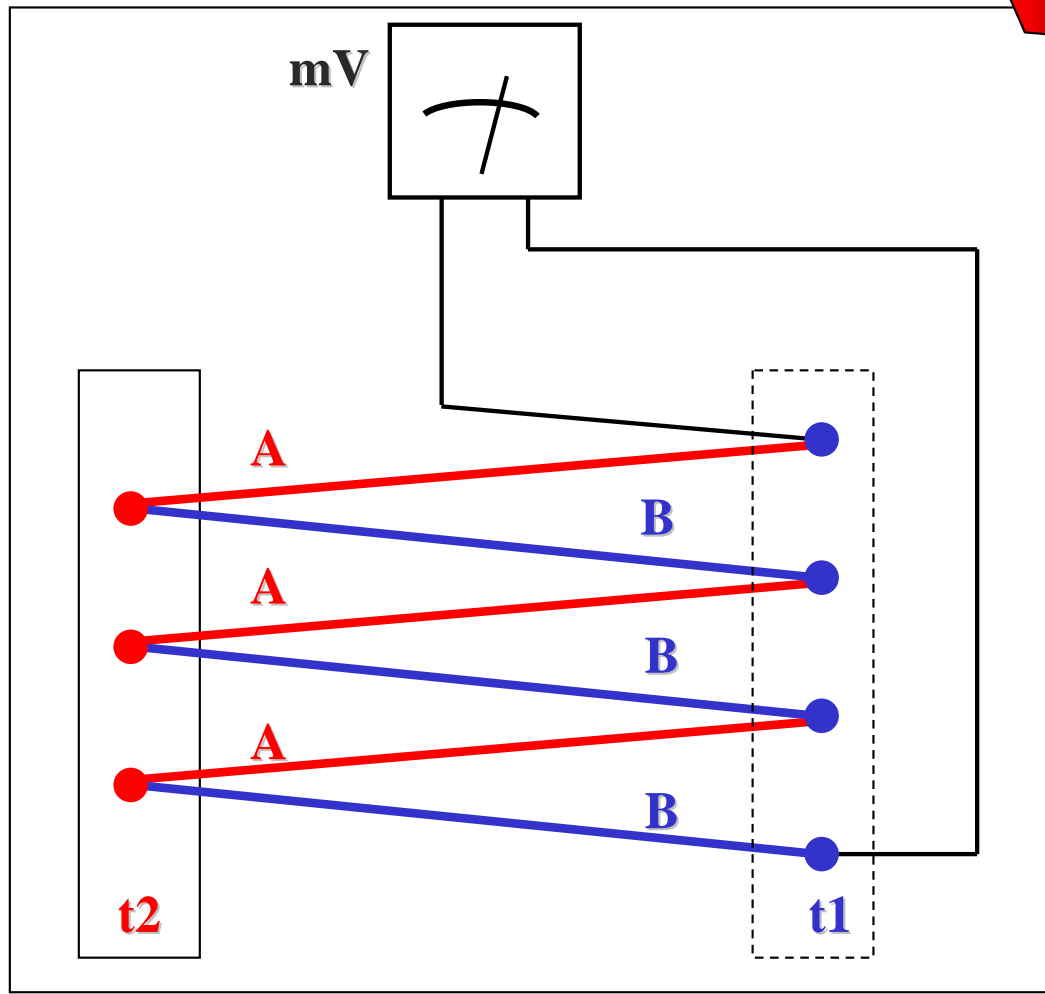
viene usato un “punto di zero elettronico”, il quale genera una f.e.m. proporzionale alla temperatura ambiente. Questa f.e.m. di compensazione corregge la f.e.m. e la riporta sul valore utile da usare come dato diretto di ingresso sulle tavole con giunto di riferimento a 0°C



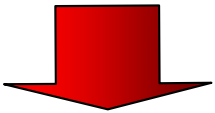
Termocoppie/12

per aumentare la sensibilità del sistema di misura, per aumentare cioè il segnale f.e.m. soprattutto per piccole differenze di temperatura può essere usata la cosiddetta

TERMOPILA



il circuito è formato da alcune termocoppie collegate in serie



la f.e.m. totale è data dalla somma delle f.e.m. delle singole coppie

Sensori IC

sono il tipo di sonda termometrica introdotta sul mercato più di recente

sfruttano una proprietà fondamentale dei semiconduttori (silicio, germanio) con cui sono realizzati per ottenere una caratteristica **LINEARE** con la temperatura

se due transistor identici funzionano con un rapporto costante della corrente di collettore, allora:

la differenza di potenziale nel loro emettitore-base sarà:

$$V \propto \frac{kT}{q}$$

poiché
k → costante di Boltzmann
q → carica dell'elettrone
sono **COSTANTI**

hanno gli stessi difetti dei PRT in più il range di temperatura è limitato dal range operativo dei circuiti integrati

la tensione può essere convertita in corrente con una resistenza a film sottile a basso coefficiente di temperatura

$$V \propto T$$

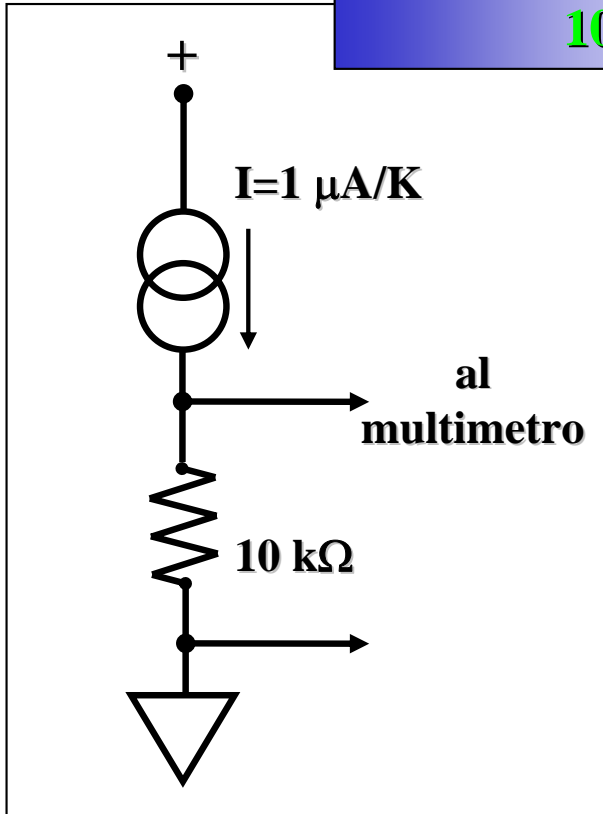
$$I \propto T$$

-50 ÷ +150°C

Sensori IC/2

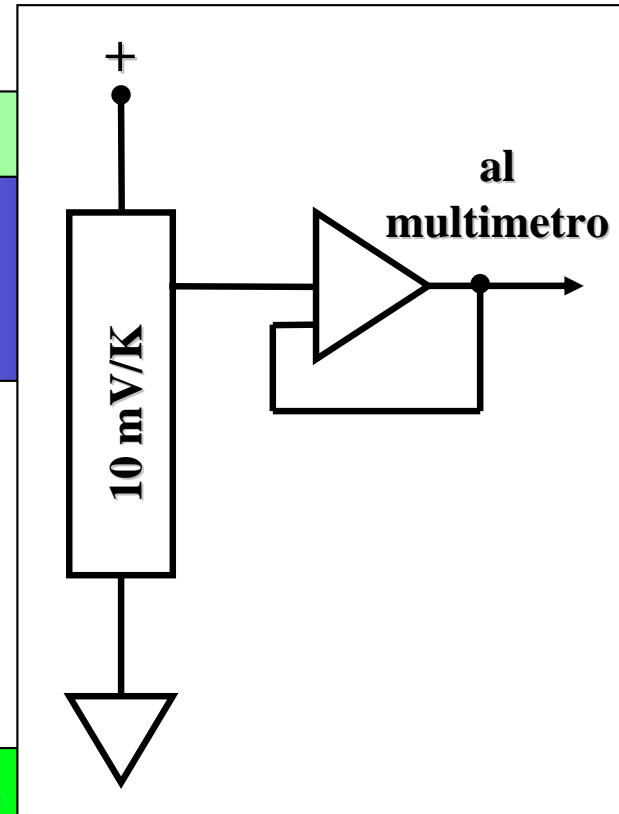
esempio di un sensore con uscita in TENSIONE

**il coefficiente di temperatura nominale è, tipicamente:
10 mV/K**



esempio di un sensore con uscita in CORRENTE

**il coefficiente di temperatura nominale è, tipicamente:
1 $\mu\text{A/K}$**



una importante caratteristica dei sensori IC risiede nel fatto che il CIRCUITO INTEGRATO può incorporare anche la circuitistica per processare il segnale nello stesso package del sensore

Sensori di temperatura/riepilogo

	PRT stelo	PRT film sottile	termistori	termocoppie	sensori IC
intervallo di temperatura	-200°C +850°C	-200°C +850°C	-100°C +500°C	-270°C +1800°C	-40°C +125°C
variabile termometrica	resistenza elettrica	resistenza elettrica	resistenza elettrica	d.d.p.	d.d.p.
valore base	25 Ω 100 Ω	100 Ω 2000 Ω	1 k Ω 1 M Ω	<1 mV @ 25°C	750 mV @ 25°C
incertezza	±0.06% ±0.2°C	±0.1% ±0.3°C	±10% ±2°C	±0.5% ±2°C	±1% ±3°C
stabilità	eccellente	eccellente	moderata	moderata	moderata
sensibilità assoluta	0.39%/°C	0.39%/°C	-4%/°C	40 μV/°C	10 mV/°C
linearità	eccellente	eccellente	fortemente non lineare	moderata	moderata

Sensori di temperatura/riepilogo,2

	PRT stelo	PRT film sottile	termistori	termocoppie	sensori IC
costante di tempo					
influenza dei cavi di colleg.	media	media	bassa	media	bassa
auto-riscaldamento	basso	basso	alto	nessuno	basso
diametro minimo sonda	2 mm	2 mm	1.6 mm	0.6 mm	2 mm
costo relativo sensore	moderato/ alto	moderato/ basso	basso	basso	basso/ moderato
costo relativo sistema	moderato	moderato	basso/ moderato	alto	basso
requisiti particolari	compensa- zione cavi		linearizza- zione	giunto di riferimento	

Sensori di temperatura/riepilogo,3

PRO

	PRT	termistori	termocoppie	sensori IC
PRO	<ul style="list-style-type: none">• stabilità• accuratezza• più lineari delle termocoppie	<ul style="list-style-type: none">• elevato segnale in uscita• veloci• collegamento a due fili	<ul style="list-style-type: none">• auto-alimentate• semplici e robuste• poco costose• ampia varietà• ampio range temperatura	<ul style="list-style-type: none">• elevata linearità• elevato segnale in uscita• poco costosi

CONTRO

CONTRO	<ul style="list-style-type: none">• costosi• richiedono alimentazione elettrica• piccolo ΔR• bassa resistenza assoluta• auto-riscaldamento	<ul style="list-style-type: none">• non lineari• limitato range temperatura• fragili• richiedono alimentazione elettrica• auto-riscaldamento	<ul style="list-style-type: none">• non lineari• basso voltaggio• poco stabili• bassa sensibilità• richiedono giunto di riferimento	<ul style="list-style-type: none">• $t < 200^\circ\text{C}$• richiedono alimentazione elettrica• lenti• auto-riscaldamento• fragili
---------------	---	--	---	---

Termometria IR

le tecniche di misura invasive viste fin qui non possono essere utilizzate quando:

- occorre misurare corpi o ambienti a temperatura **SUPERIORE** alla MAX di impiego dei sensori invasivi
- occorre misurare la temperatura di corpi o ambienti **distanti** o comunque **INACCESSIBILI**
- occorre misurare la temperatura di corpi o ambienti chimicamente **AGGRESSIVI** o **RADIOATTIVI**

in questi casi

VARIABILE TERMOMETRICA

l'emissione di radiazione elettromagnetica del

radiazione e.m.

CORPO NERO

$$e_{\lambda,n} = e_{\lambda,n}(\lambda, T)$$

LEGGE DI PLANCK

$$e_{\lambda,n}(\lambda, T) = \pi I_{\lambda,n,e}(\lambda, T) = \frac{\pi C_1}{\lambda^5 \left(e^{C_2/\lambda T} - 1 \right)}$$

$$\left[W \cdot m^{-2} \cdot \mu m^{-1} \right]$$

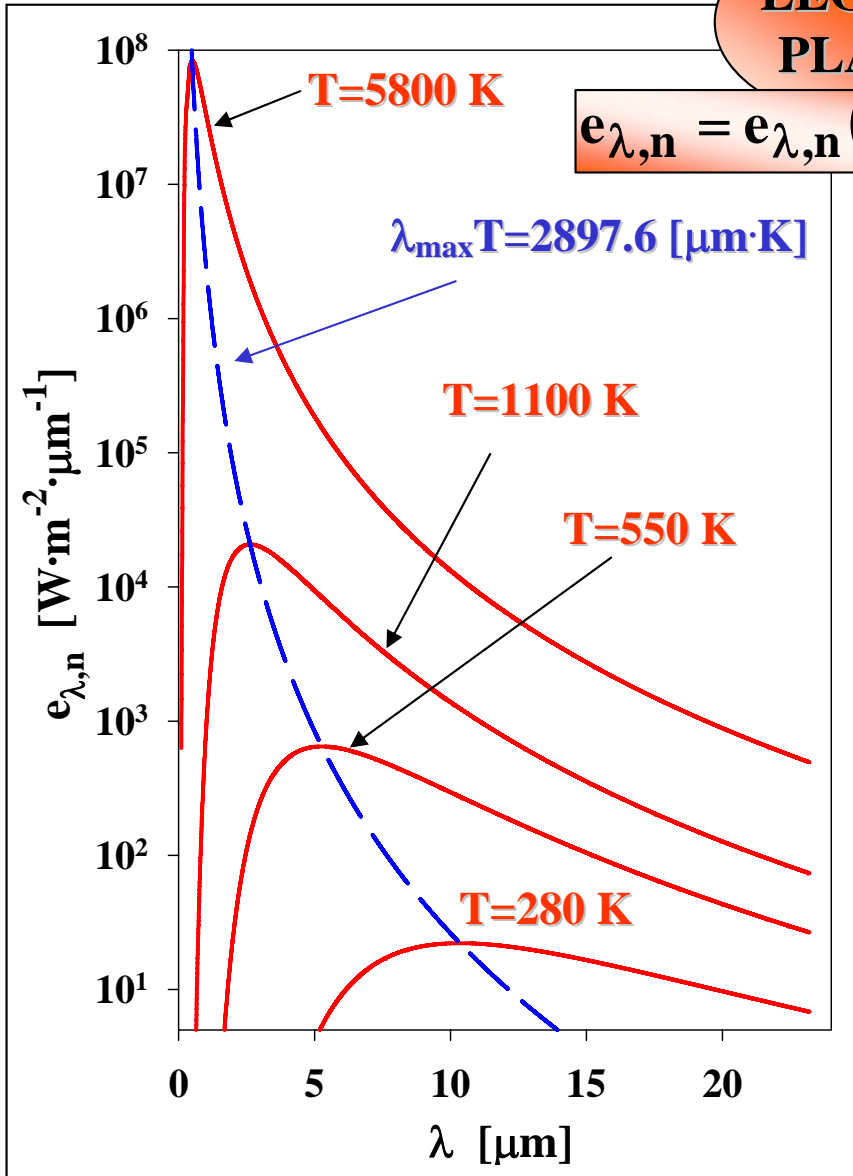
Termometria IR/2

LEGGE DI PLANCK

$$e_{\lambda,n} = e_{\lambda,n}(\lambda, T)$$

l'energia posseduta da ciascun FOTONE vale:

$$L_{\text{fotone}} = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$



i fotoni viaggiano in linea retta, possono essere deviati e/o riflessi da lenti e specchi appropriati

si tratta di interporre al cammino dei fotoni un apposito **SENSORE**, capace di assorbire il loro flusso e di convertirlo in un segnale utilizzabile per la lettura della **TEMPERATURA**

SENSORI

TERMICI, o BOLOMETRICI

QUANTICI, o FOTOELETTRICI

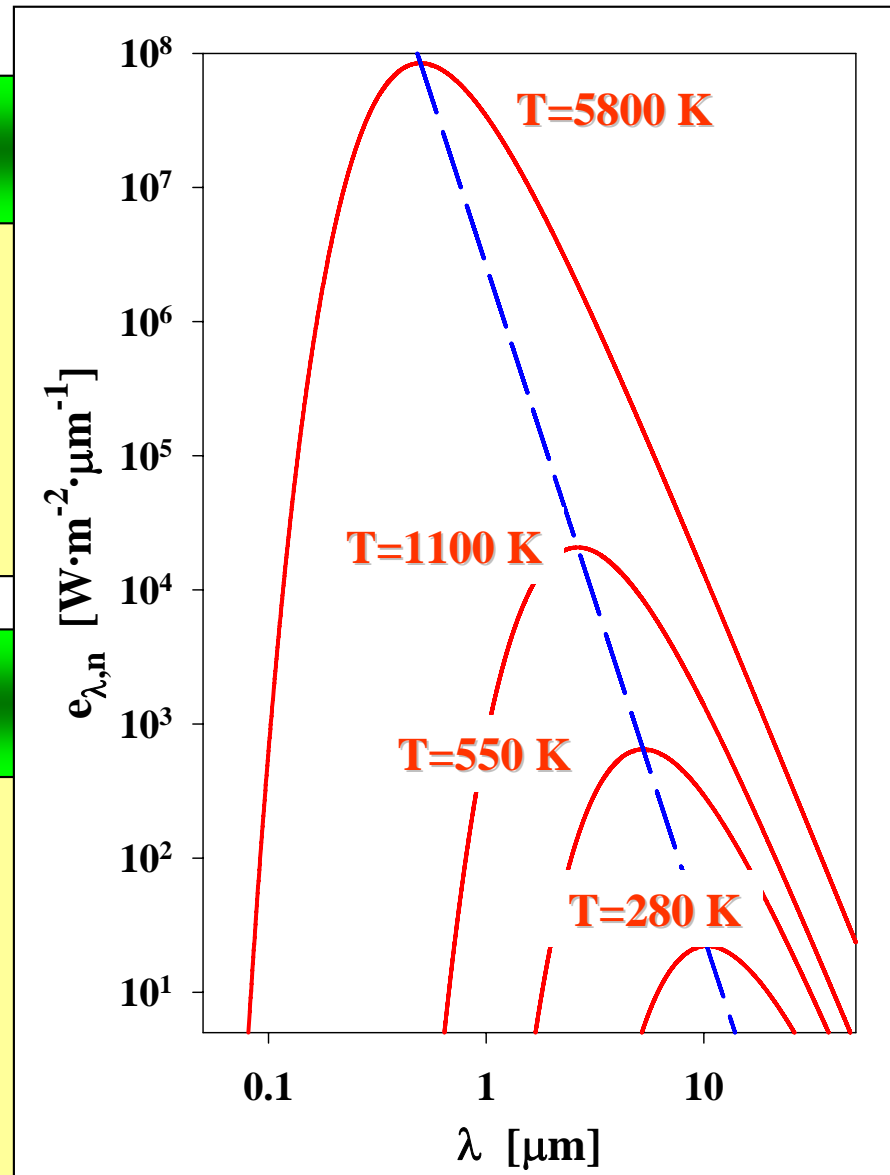
Termometria IR/3

sensori TERMICI, o BOLOMETRICI

la radiazione incidente viene dissipata sul sensore e ne aumenta la temperatura, facendo variare una grandezza termometrica (di solito la resistenza elettrica)

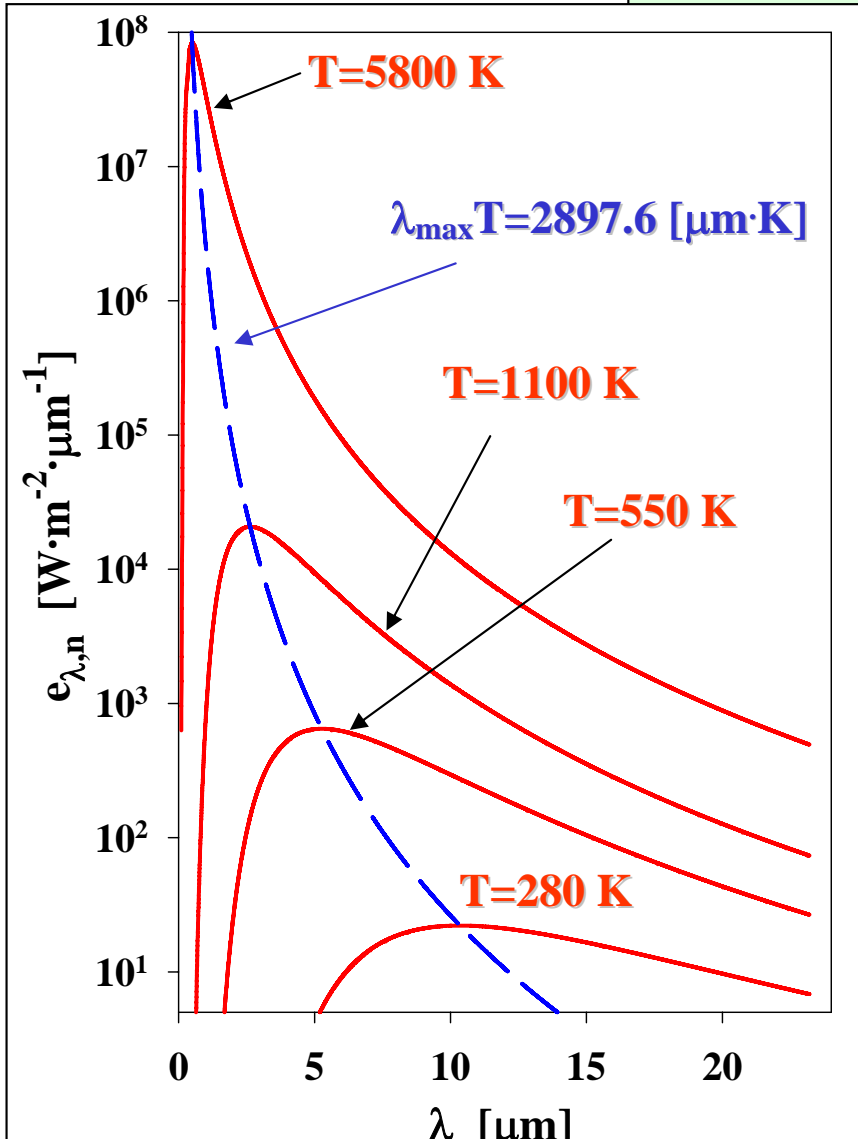
sensori QUANTICI, o FOTOELETTRICI

il fotone incidente induce nel sensore, che è un semiconduttore, una coppia lacuna-elettrone, e quindi un segnale elettrico utilizzabile; la radiazione deve avere una energia sufficiente per superare il band-gap del semiconduttore



normalmente si utilizzano sensori in
InSb (8-12 μm) o HgTe+CdTe (3-5 μm)

Termometria IR/4



normalmente si utilizzano sensori in

InSb (8-12 μm)

HgTe+CdTe (3-5 μm)

poiché il massimo delle curve si sposta verso destra all'aumentare della temperatura, è importante selezionare un sensore capace di operare sulla porzione ottimale dello spettro per ottenere prestazioni soddisfacenti

le curve della

distribuzione di Planck presentano una dissimmetria molto pronunciata, in quanto la parte crescente con λ è molto più ripida della successiva parte

decescente; si può facilmente vedere che per $\lambda \leq 0.5\lambda_{\text{max}}$ la frazione di energia contenuta è inferiore all'1%, mentre lo stesso risultato si ottiene per $\lambda \geq 4.5\lambda_{\text{max}}$

Termometria IR/5

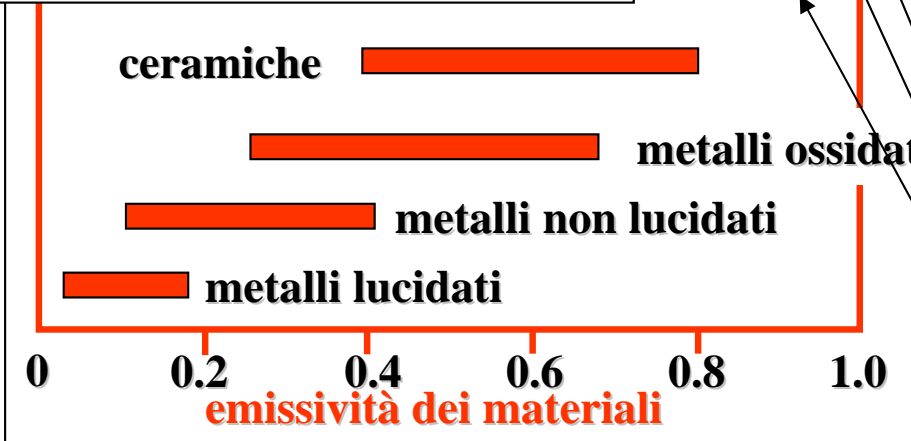
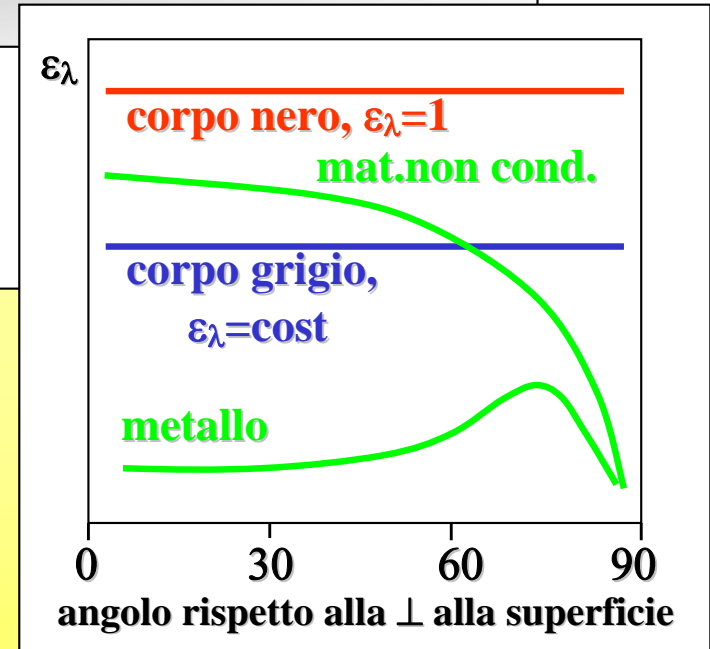
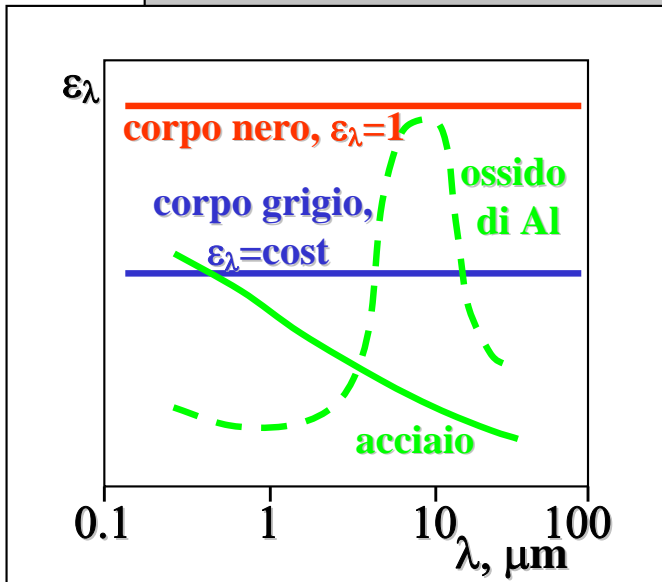
i corpi reali non si comportano come il **CORPO NERO**, ma sono caratterizzati dalla proprietà **emissività**

emissività
monocromatica
emisferica:

$$\varepsilon_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{e_{\lambda}(\lambda, T)}{e_{\lambda,n}(\lambda, T)}$$

ad esempio

emissività

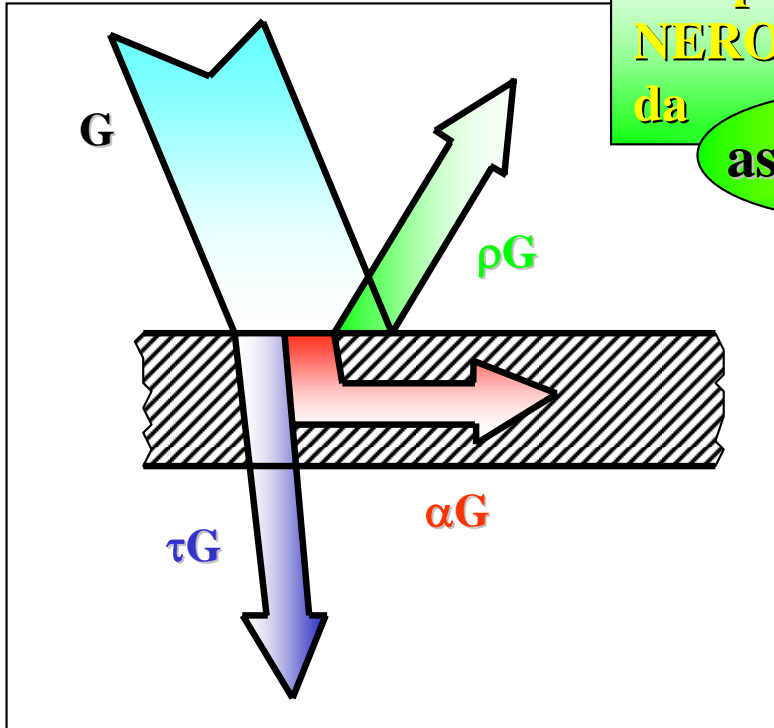


- vegetazione, acqua, pelle
- mater. da costr., vernici
- rocce, terreno
- vetri, minerali
- carbone

Termometria IR/6

i corpi reali non si comportano come il **CORPO NERO**, ma sono caratterizzati da

assorptività **tramissività** **riflettività**

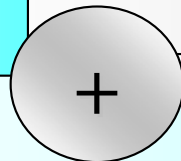


L'IRRADIANZA incidente si ripartisce nelle tre componenti che danno origine, per il bilancio energetico, alle

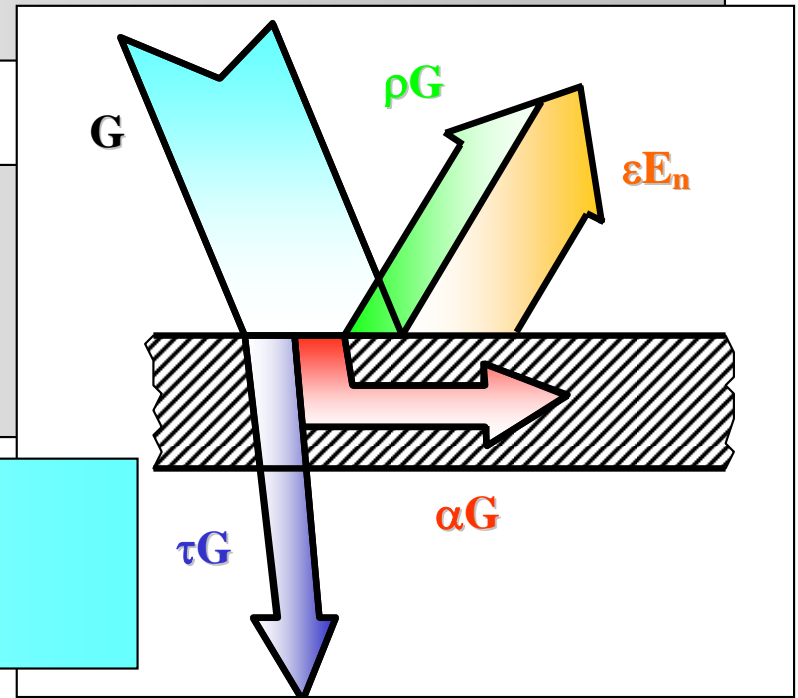
$$G = \alpha G + \rho G + \tau G \quad \alpha + \rho + \tau = 1$$

la **RADIOSITA'** è l'energia raggiante che complessivamente lascia una superficie, costituita dai due contributi:

EMISSIONE DIRETTA



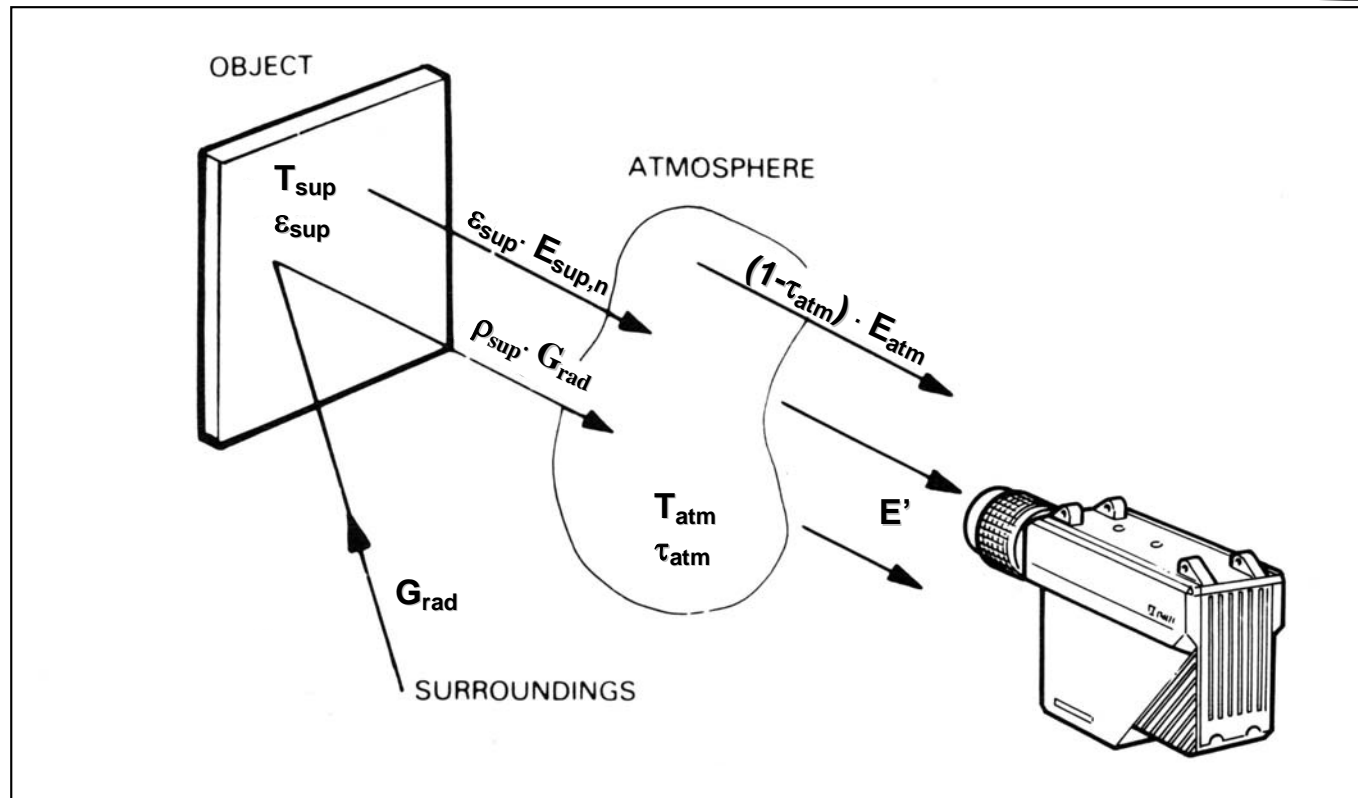
RIFLESSIONE
di una parte dell'irradianza che incide sulla superficie



Termometria IR/7

il sensore deve pertanto tenere conto di:

- energia emessa dalla superficie osservata $E_{sup} = f(T_{sup}), \epsilon_{sup}$
- energia riflessa dalla superficie osservata $G_{rad} = f(T_{rad}), \rho_{sup}$
- assorbimento dell'aria $E_{atm} = f(T_{atm}), \tau_{atm}$



se l'emissività della superficie è molto lontana da 1 bisogna intervenire, manualmente e/o automaticamente

$$E' = \epsilon_{sup} \cdot E_{sup,n} \cdot \tau_{atm} + \rho_{sup} \cdot G_{rad} \cdot \tau_{atm} + (1 - \tau_{atm}) E_{atm}$$

Termometria IR/8

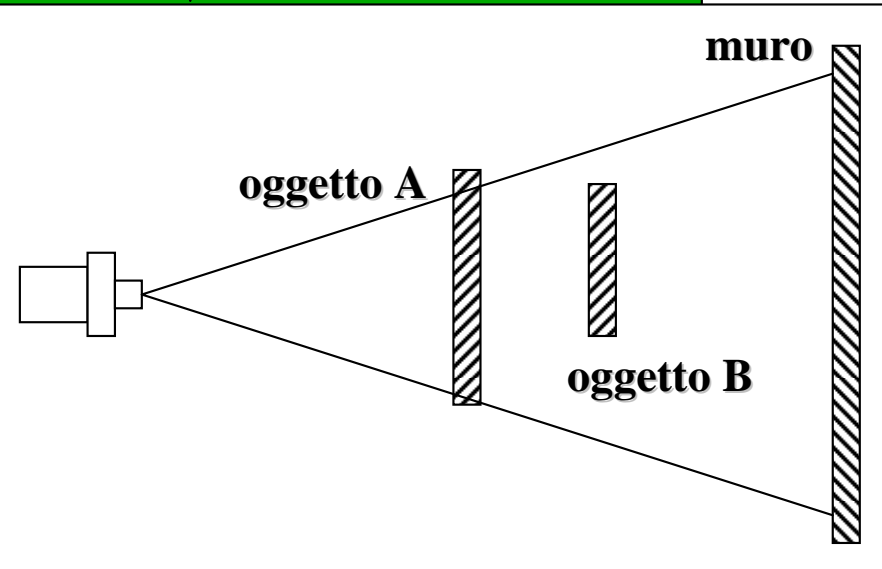
ogni strumento per termometria IR ha il suo angolo di visione nel quale lo strumento media tutte le temperature che vede

FOV
Field Of View

un aspetto critico per l'accuratezza della termometria IR sono

la **DISTANZA** e le **DIMENSIONI** dell'oggetto da misurare

se si misura l'oggetto A non c'è problema; se si rimuove A, la misura di B sarebbe influenzata dalla temperatura del muro



il

FOV
Field Of View

può essere descritto con il suo angolo

ovvero con il rapporto **DISTANCE/SPOT-SIZE**

D:S

un rapporto

D:S=60:1

equivale ad un

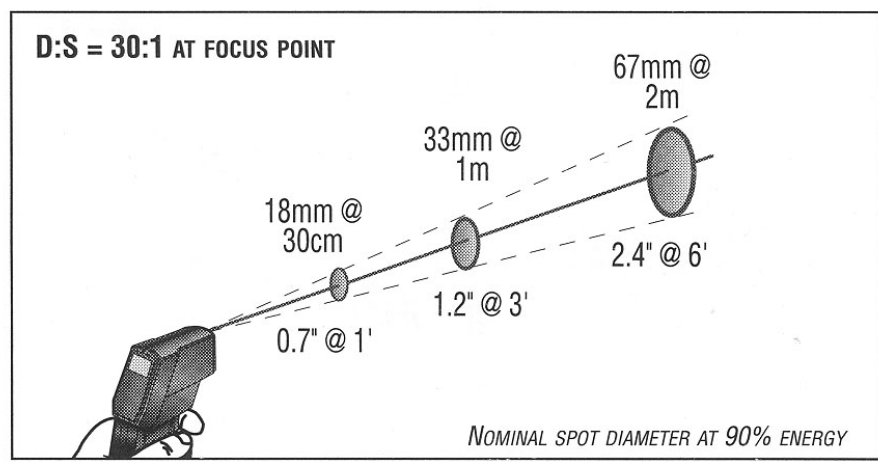
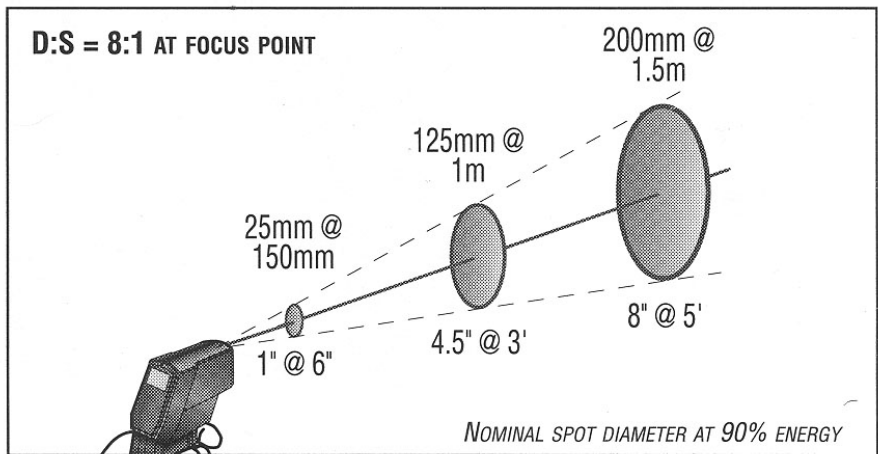
FOV=1°

Termometria IR/9

gli strumenti di misura sono dotati di uno o più FOV:

DISTANCE & SPOT SIZE
DISTANCIAS Y DIANAS

DISTÂNCIA O DIÂMETRO
DISTANCE ET TAILLE DU POINT



per garantire letture accurate da parte dello strumento, la distanza dall'oggetto da misurare deve essere quella **APPROPRIATA**

la **DISTANZA** appropriata si determina considerando l'area che lo strumento misurerà (**SPOT SIZE**) e le dimensioni dell'oggetto da misurare

maggiore la distanza dall'oggetto da misurare, maggiore lo SPOT SIZE

in tutti questi casi lo strumento permette di leggere **UN SOLO**

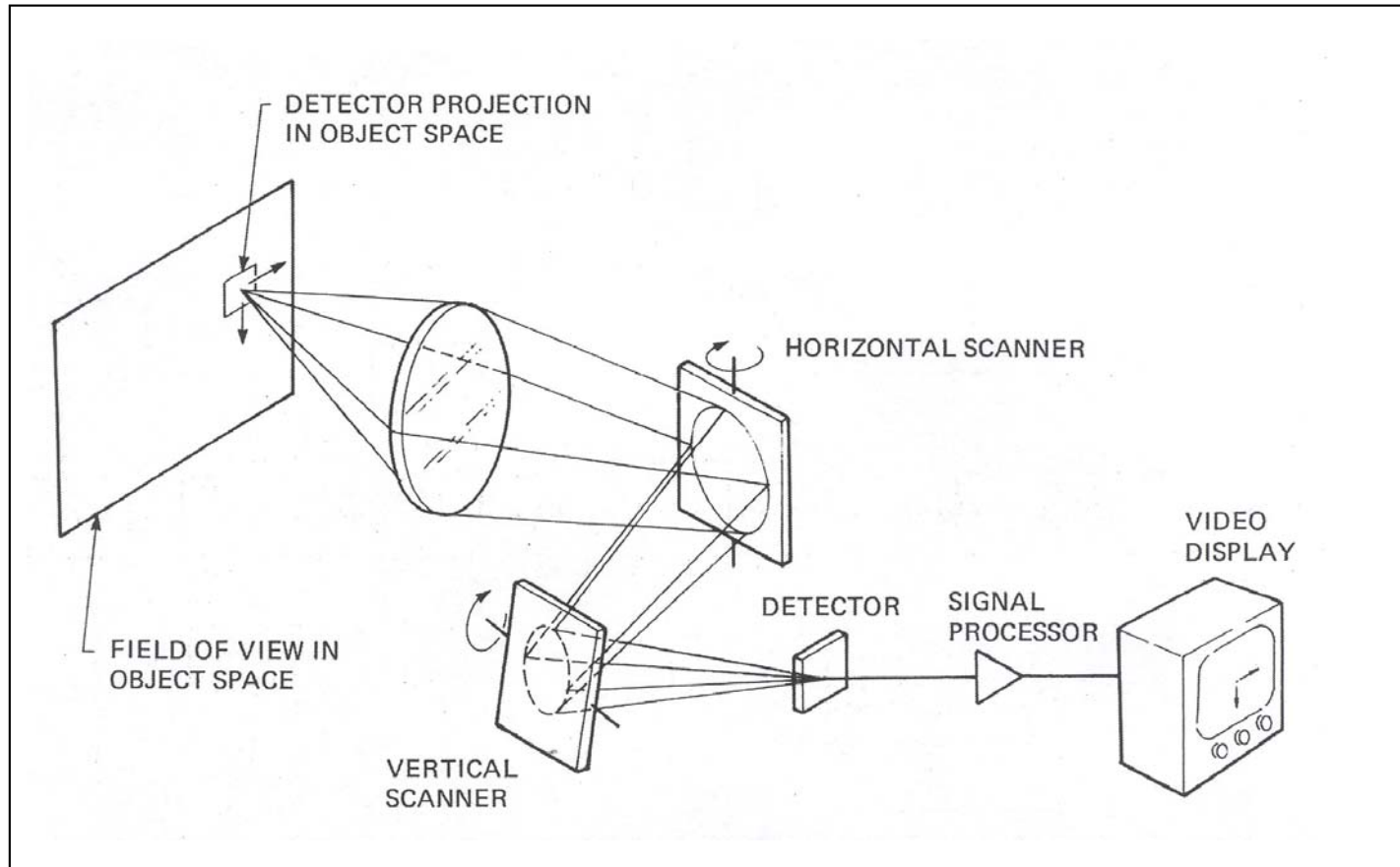
VALORE DI TEMPERATURA per tutta l'area dello **SPOT SIZE**

Termometria IR/10

per valutare le **DIFFERENZA DI TEMPERATURA** in una data superficie

la telecamera IR
effettua un processo di scansione della superficie da misurare, la cui efficacia è fortemente connessa alla minima porzione rilevabile dal sensore

TERMOGRAFIA IR



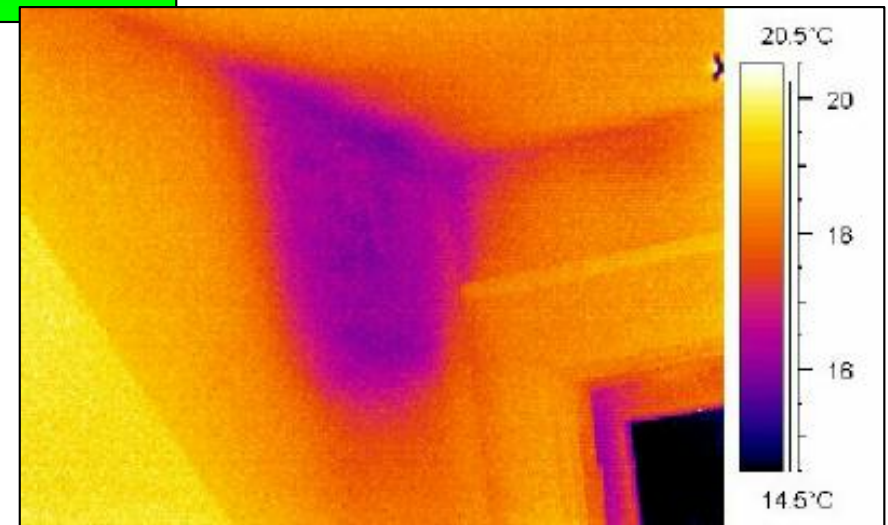
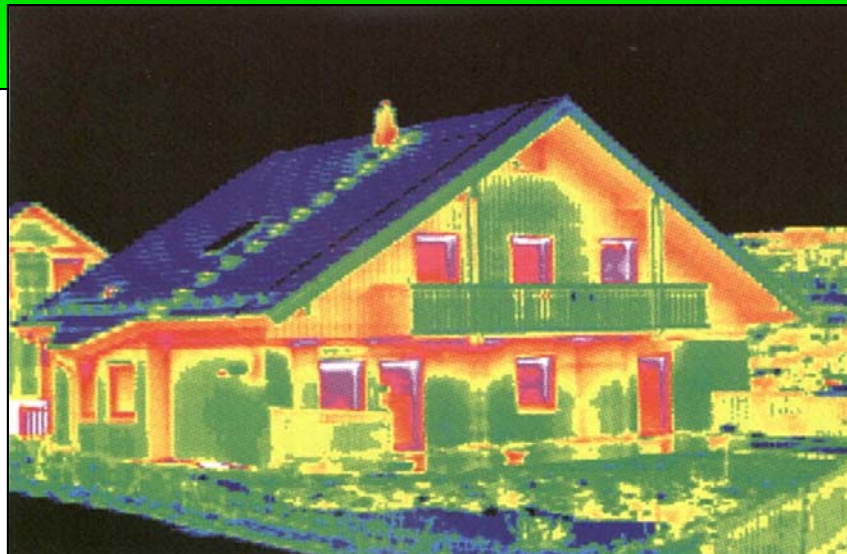
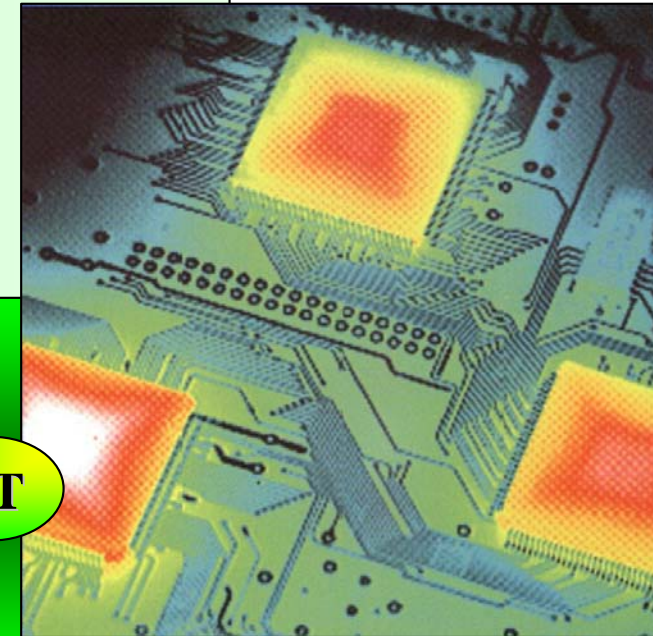
nei sistemi **Focal Plane Array** è possibile una scansione in tempo reale grazie alla presenza di una **matrice di sensori**

Termometria IR/11

i sensori per TERMOGRAFIA IR hanno bisogno di raffreddamento

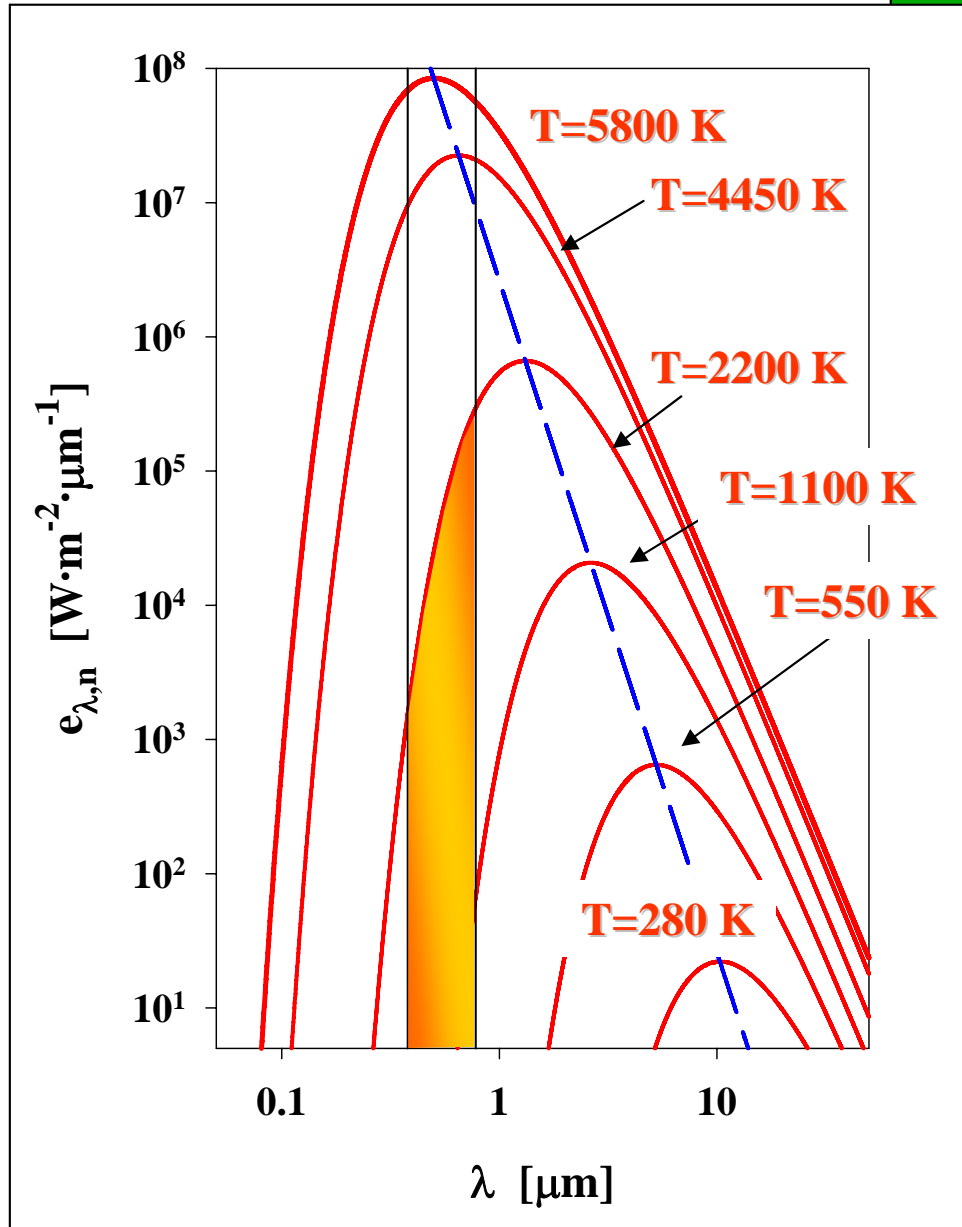
- con azoto liquido (70 K)
(adatto per radiazione a bassa e ad alta λ)
- con refrigeratore Peltier (200 K)
(adatto per radiazione a bassa λ)
- con refrigeratore Stirling (75 K)
(adatto per radiazione a bassa e ad alta λ)

la TERMOGRAFIA IR è poco accurata nella misura delle TEMPERATURE ASSOLUTE ma è molto accurata nella valutazione dei ΔT all'interno della superficie oggetto della scansione



Termometria IR/12

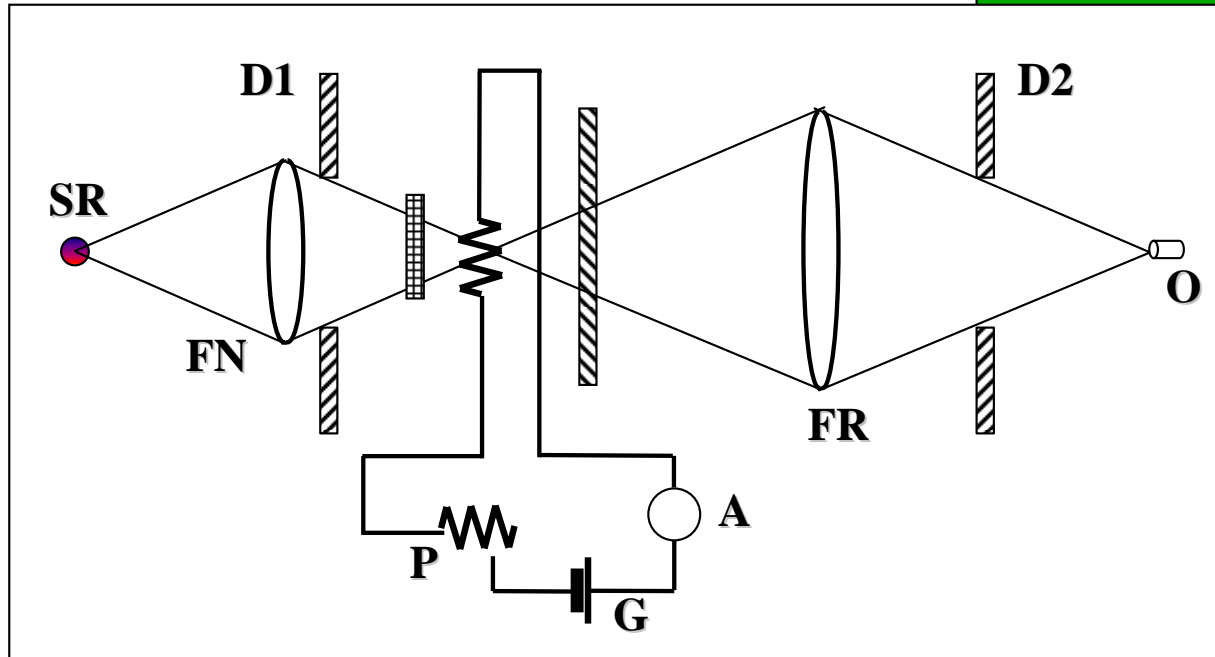
PIROMETRI A RADIAZIONE MONOCROMATICA



è uno strumento adatto per misurare corpi a temperatura elevata, non accessibili (per esempio il filamento di una lampada ad incandescenza)

la radiazione emessa deve essere, almeno in parte, nel campo del VISIBILE

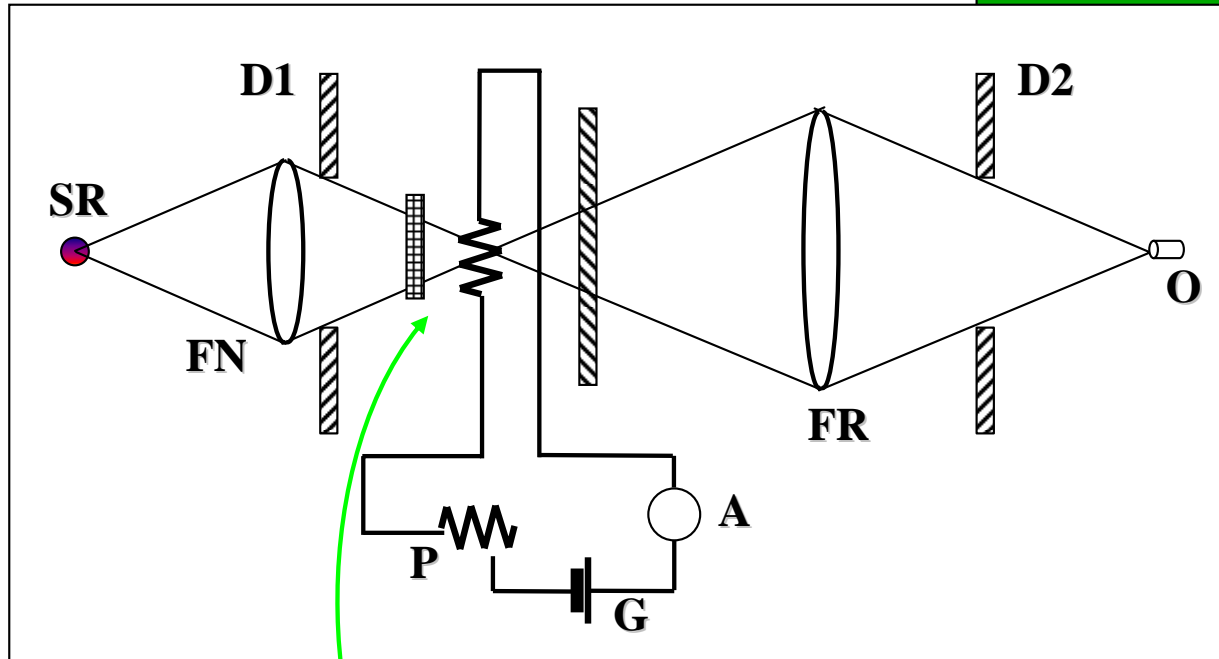
PIROMETRI A RADIAZIONE MONOCROMATICA



- SR sorgente radiante
- D1 diaframma fisso
- FN filtro neutro
- FR filtro rosso
- D2 diaframma mobile
- O oculare
- P potenziometro
- G alimentatore
- A amperometro

- FN** → attenua **TUTTE** le componenti monocromatiche con lo stesso rapporto
- FR** → fa passare solo una stretta banda di componenti con lunghezza d'onda in un intorno sufficientemente piccolo di $\lambda=0.65 \mu\text{m}$
- D1** → è fisso perché l'eventuale operazione di messa a fuoco non deve alterare l'angolo di ingresso allo strumento
- D2** → è mobile perché l'angolo di uscita è scelto per ottimizzare la resa visiva

PIROMETRI A RADIAZIONE MONOCROMATICA



- SR sorgente radiante
- D1 diaframma fisso
- FN filtro neutro
- FR filtro rosso
- D2 diaframma mobile
- O oculare
- P potenziometro
- G alimentatore
- A amperometro

attraverso l'oculare si confronta visivamente la luminosità della SR e quella del filo di riferimento riscaldato da G

si fissa con P la corrente I fin tanto che il colore rosso della SR eguaglia il colore del filamento (cioè il filamento della lampada scompare sulla superficie SR)