



POLITECNICO
MILANO 1863

Irraggiamento

Prof. Ing. Alberto Salioni

Irraggiamento

Definizione:

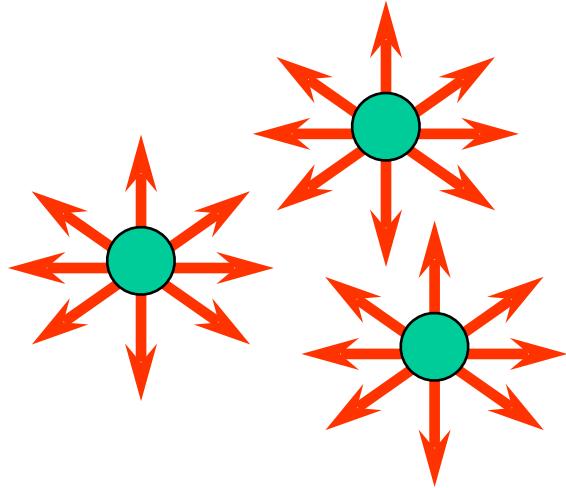
L'irraggiamento è il trasferimento di energia che avviene mediante onde elettromagnetiche (o fotoni) prodotte da variazioni nelle configurazioni elettroniche degli atomi e delle molecole.

Irraggiamento: Notazioni varie

- Nel 1887 H. Hertz dimostrò sperimentalmente l'esistenza delle onde elettromagnetiche.
- La radiazione si propaga nel vuoto o in un mezzo di trasmissione trasparente alla radiazione alla velocità della luce.
- Le onde elettromagnetiche sono caratterizzate da:
 - Frequenza: ν
Numero di oscillazioni al secondo. Dipende solo dalla sorgente.
 - Lunghezza d'onda: $\lambda = c / \nu$
 c è la velocità della luce nel mezzo di trasmissione.
 λ Dipende dalla sorgente e dal mezzo di propagazione.



Il Fenomeno



Fenomeno volumetrico:
(es. gas, vetro, mezzi trasparenti)



Fenomeno superficiale:
(es. solidi, mezzi non trasparenti)

Nb doppia interpretazione:

- *Radiazione come propagazione di onde elettromagnetiche*
- *Radiazione come propagazione di quanti di energia (fotoni)*

Spettro Elettromagnetico

Radiazione termica e trasmissione del calore

- *Nello studio della trasmissione del calore, poiché interessa solo l'energia emessa dai corpi a causa della loro temperatura, si considera esclusivamente la componente di radiazione responsabile di questo fenomeno.*
- *La parte di radiazione responsabile delle variazioni di temperatura prende il nome di "radiazione termica". La sua componente spettrale è compresa tra*
- $0.1 \mu\text{m} < \lambda < 100 \mu\text{m}$
- *La radiazione termica è dovuta ai moti vibratori e rotatori delle molecole, atomi ed elettroni che compongono le diverse sostanze.*
- *Per la sua natura fisica la radiazione termica è caratterizzabile per una distribuzione spettrale ed una distribuzione direzionale.*
- *Poiché la temperatura è una misura dell'intensità di questi processi, all'aumentare della temperatura, aumenta l'emissione di radiazione termica.*
- *La radiazione termica è emessa continuamente da tutta la materia che si trova a temperatura superiore allo zero assoluto.*

Le componenti della radiazione termica

- Radiazione visibile:

Si tratta della componente visibile dello spettro elettromagnetico ed è compresa tra $0,4 \mu\text{m} < \lambda < 0,76 \mu\text{m}$.

- Radiazione infrarossa:

Si tratta della componente di radiazione termica dei corpi a bassa temperatura e ricopre lo spettro compreso tra $0,76 \mu\text{m} < \lambda < 100 \mu\text{m}$.

- Radiazione ultravioletta:

Si tratta della componente di radiazione a bassa lunghezza d'onda della radiazione termica ed è compresa tra $0,01 \mu\text{m} < \lambda < 0,40 \mu\text{m}$.

Radiazione Visibile

- *Completamente inglobata dalla radiazione termica.*
- *Spettro compreso tra $0,1 \mu\text{m} < \lambda < 0,76 \mu\text{m}$.*
- *La radiazione visibile viene emessa dai corpi ad alta temperatura e viene in parte assorbita ed in parte riflessa dalle superfici sulla quale incide. A seconda della componente spettrale che viene riflessa l'occhio umano percepisce i colori:*
 - *Violetto: componente spettrale riflessa compresa tra $0,40 - 0,44 \mu\text{m}$*
 - *Blu: componente spettrale riflessa compresa tra $0,44 - 0,49 \mu\text{m}$*
 - *Verde: componente spettrale riflessa compresa tra $0,49 - 0,54 \mu\text{m}$*
 - *Giallo: componente spettrale riflessa compresa tra $0,54 - 0,60 \mu\text{m}$*
 - *Arancio: componente spettrale riflessa compresa tra $0,60 - 0,63 \mu\text{m}$*
 - *Rosso: componente spettrale riflessa compresa tra $0,63 - 0,76 \mu\text{m}$*
 - *Nero: luce incidente completamente assorbita.*
 - *Bianco: luce incidente completamente riflessa.*

Radiazione infrarossa

- *Completamente inglobata dalla radiazione termica.*
- *Spettro compreso tra $0,76 \mu\text{m} < \lambda < 100\mu\text{m}$.*
- *La radiazione infrarossa è la radiazione emessa dai corpi che si trovano a bassa temperatura. Solo a temperature superiori agli 800°K i corpi iniziano ad emettere radiazione visibile apprezzabile. Nella lampadina ad incandescenza, il filamento di tungsteno, per diventare luminoso, deve essere riscaldato a 2000°K .*
- *L'occhio umano non è in grado di percepirla ma quello di altre specie animali è in grado di farlo (ad es. alcuni serpenti).*

Radiazione ultravioletta

- *Parzialmente inglobata dalla radiazione termica.*
- *Spettro compreso tra $0,01 \mu\text{m} < \lambda < 0,40 \mu\text{m}$.*
- *I raggi ultravioletti sono da evitare perché dannosi agli organismi viventi.*
- *Circa il 12% della radiazione solare al di fuori dell'atmosfera è nel campo ultravioletto.*
- *Lo strato di ozono O_3 dell'atmosfera fa da scudo protettivo assorbendo la maggior parte della radiazione ultravioletta extratmosferica.*
- *La relativa recente scoperta di "buchi" nello strato di ozono hanno costretto la comunità internazionale a bandire l'uso di sostanze chimiche che distruggono l'ozono (CFC, refrigerante freon 12, ecc.)*
- *L'occhio umano non è in grado di percepirla. Quello di altre specie animali è in grado di farlo (es. Api)*

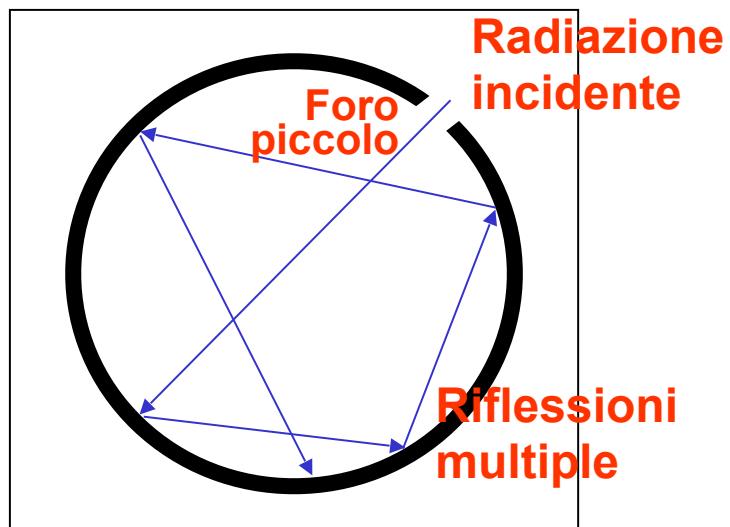
Definizione

*Il **corpo nero** è un perfetto emettitore di radiazioni poiché emette la massima radiazione ad ogni temperatura e lunghezza d'onda e assorbe tutta la radiazione incidente indipendentemente da direzione e lunghezza d'onda.*

Approssimazione reale del corpo nero

Poiché la radiazione termica occupa una banda molto ristretta dello spettro, non si può giudicare se una superficie approssima il comportamento del corpo nero sulla base della sola osservazione visiva.

Un corpo che approssima il comportamento del corpo nero è una cavità con una piccola apertura.



L'energia che giunge sull'apertura entra nella cavità. Se le pareti di questa non sono nere, un raggio incidente verrà in parte assorbito e in parte riflesso. Attraverso riflessioni multiple, la frazione riflessa si attenuerà, sicché tutta l'energia verrà assorbita, salvo una quantità inapprezzabile

Potenza radiante del corpo nero

La potenza radiante totale emessa da un corpo nero per unità di area superficiale è detta anche potere emissivo del corpo nero ed è espressa dalla relazione di Stefan- Boltzmann:

$$E_n = \sigma T^4 \quad [W/m^2]$$

*Dove $\sigma = 5,67 * 10^{-8} [W/m^2 K^4]$ è la costante di Stefan-Boltzmann*

NB: Il potere emissivo del corpo nero è proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta.

Potere emissivo monocromatico o spettrale del corpo nero

Il potere emissivo monocromatico o spettrale del corpo nero fornisce la potenza emessa, in funzione della temperatura e della lunghezza d'onda e si definisce come:

Potenza radiante emessa dal corpo nero alla temperatura assoluta T per unità di area superficiale e per unità di lunghezza d'onda nell'intorno della lunghezza d'onda λ .

Per effettuare un calcolo quantitativo è necessario ricorrere ad una relazione note come “legge della distribuzione di Planck”.

Legge della distribuzione di Planck

$$E_{n\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp(C_2/\lambda T) - 1 \right]} \quad [W/m^2 \cdot \mu m]$$

dove:

$$C_1 = 3,742 \quad [W \cdot \mu m^4 / m^2]$$

$$C_2 = 1,439 \quad [\mu m \cdot K]$$

T = temperatura assoluta [K]

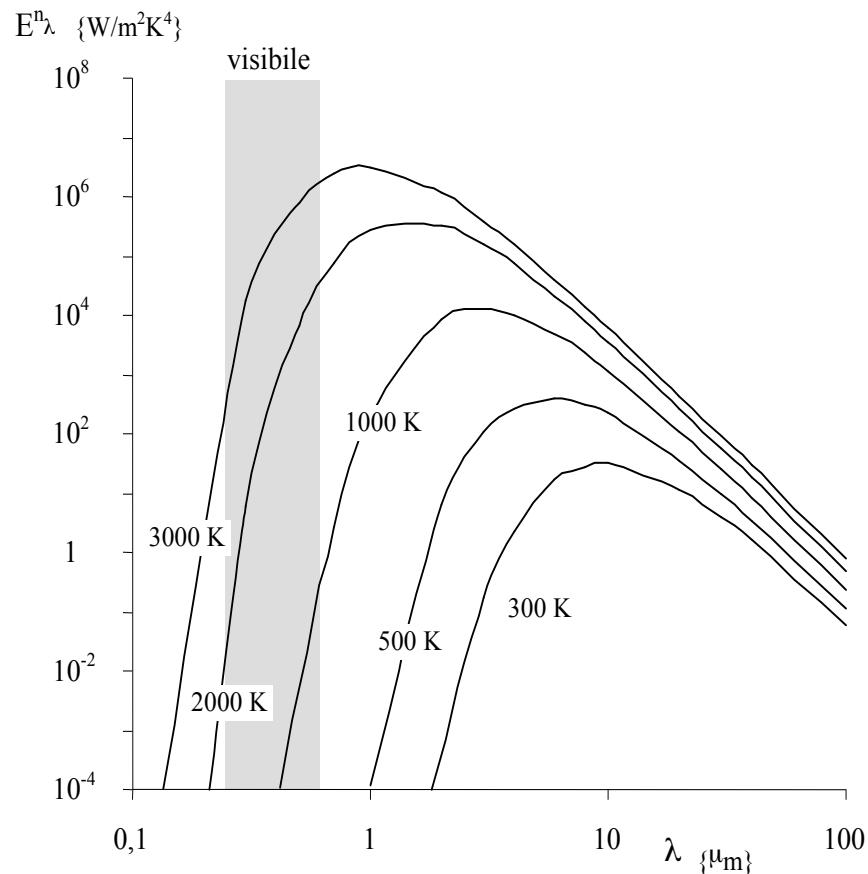
λ = lunghezza d'onda della radiazione emessa

L'integrale della potenza radiante emessa per una lunghezza d'onda da zero ad infinito definisce il potere emissivo del corpo nero alla temperatura T:

$$\int_{\lambda=0}^{\infty} E_{n\lambda}(T) d\lambda = E_n = \sigma T^4$$

Variazione del potere emissivo di un corpo nero

Variazione in funzione della Temperatura



- La radiazione emessa è funzione continua della lunghezza d'onda.
- La radiazione emessa dal sole, considerato un corpo nero, raggiunge il suo picco nella zona visibile.
- Superifici a $T < 800^\circ\text{K}$ emettono invece quasi interamente nella regione infrarossa e pertanto non sono visibili all'occhio umano.

Legge dello spostamento di Wien

Osservando il grafico precedente si osserva che i picchi corrispondenti al massimo valore di E giacciono in un particolare intorno di lunghezze d'onda.

La legge che regola i picchi del potere emissivo di un corpo nero è la legge di Wien (detta anche legge dello spostamento) ed afferma che:

$$(\lambda T)_{\max \text{ potenza}} = 2897,8 \text{ } [\mu\text{mK}]$$

Emissività

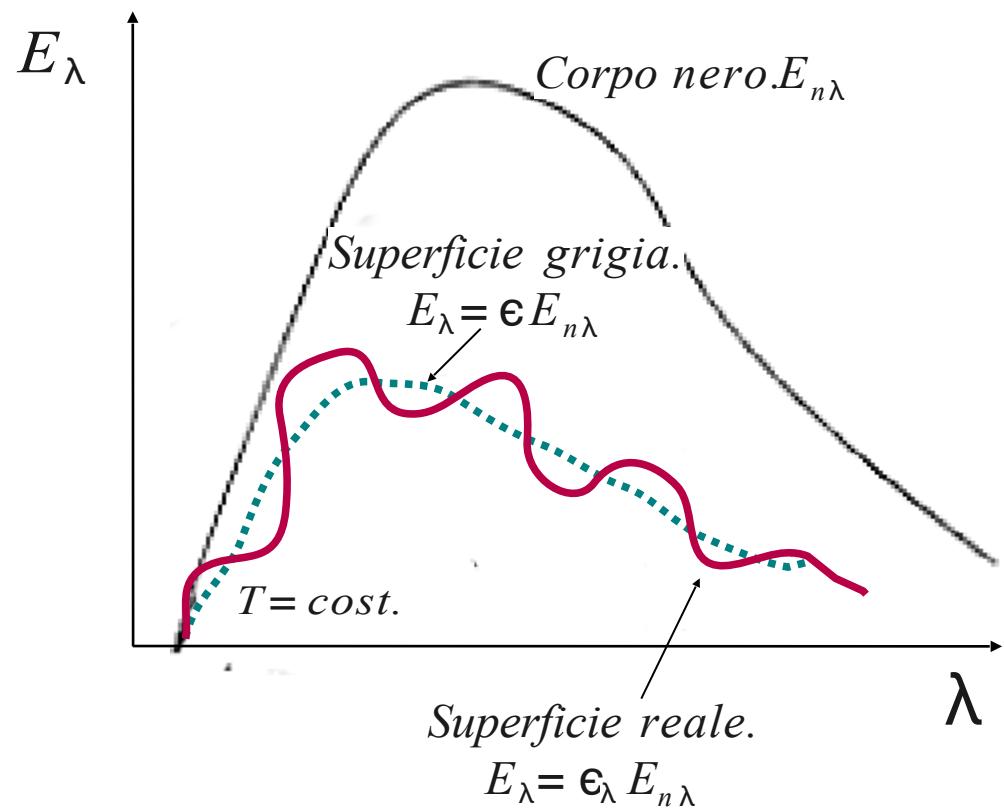
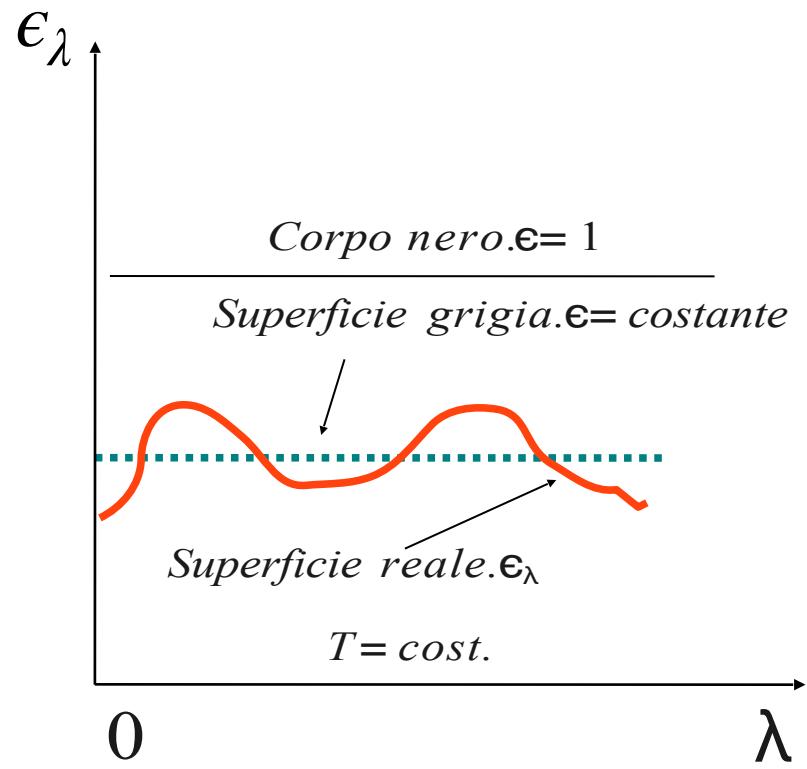
L'emissività di una superficie è il rapporto tra la radiazione emessa dalla superficie stessa e la radiazione del corpo nero alla medesima temperatura.

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_n(T)} = \frac{E(T)}{\sigma T^4}$$

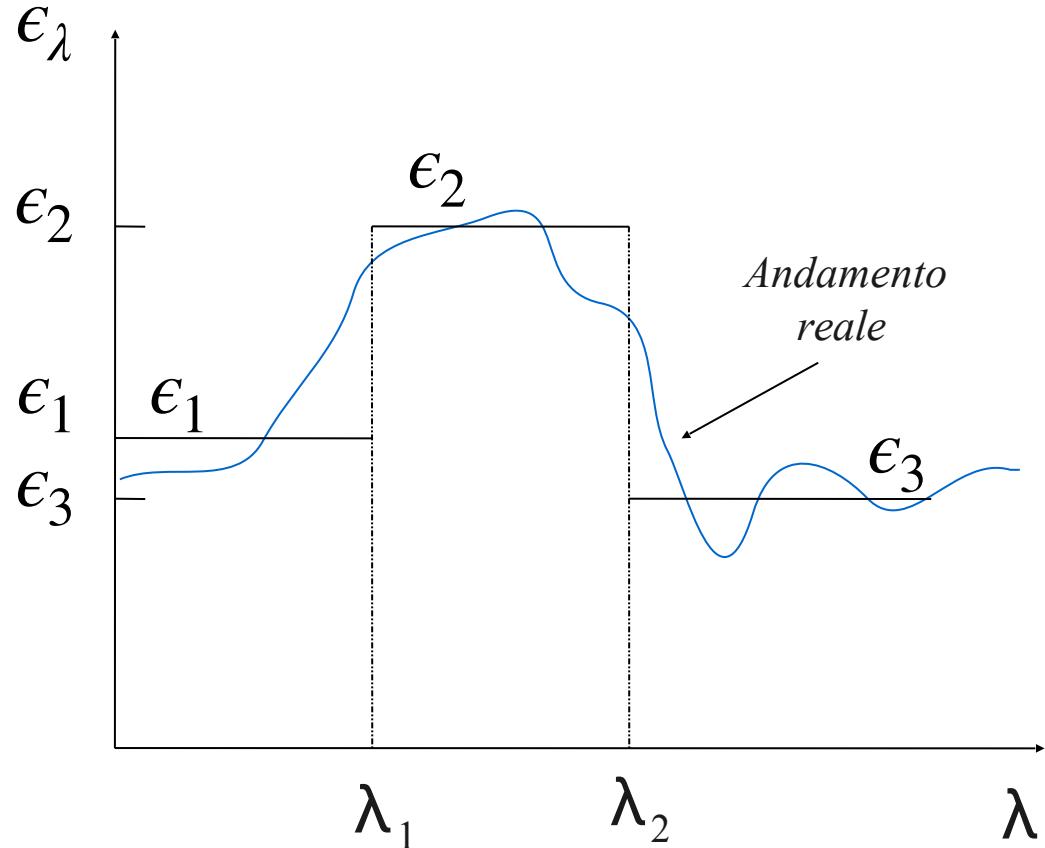
Dalla quale ovviamente segue che

$$E(T) = \varepsilon(T) \cdot \sigma T^4 \quad [W/m^2]$$

Grafici Emissività



Grafici Emissività



Approssimazione con una
funzione a gradino della
variazione dell'emissività con
la lunghezza d'onda

Superfici Emissive particolari

SUPERFICIE DIFFONDENTE:

Le sue proprietà risultano indipendenti dalla direzione.

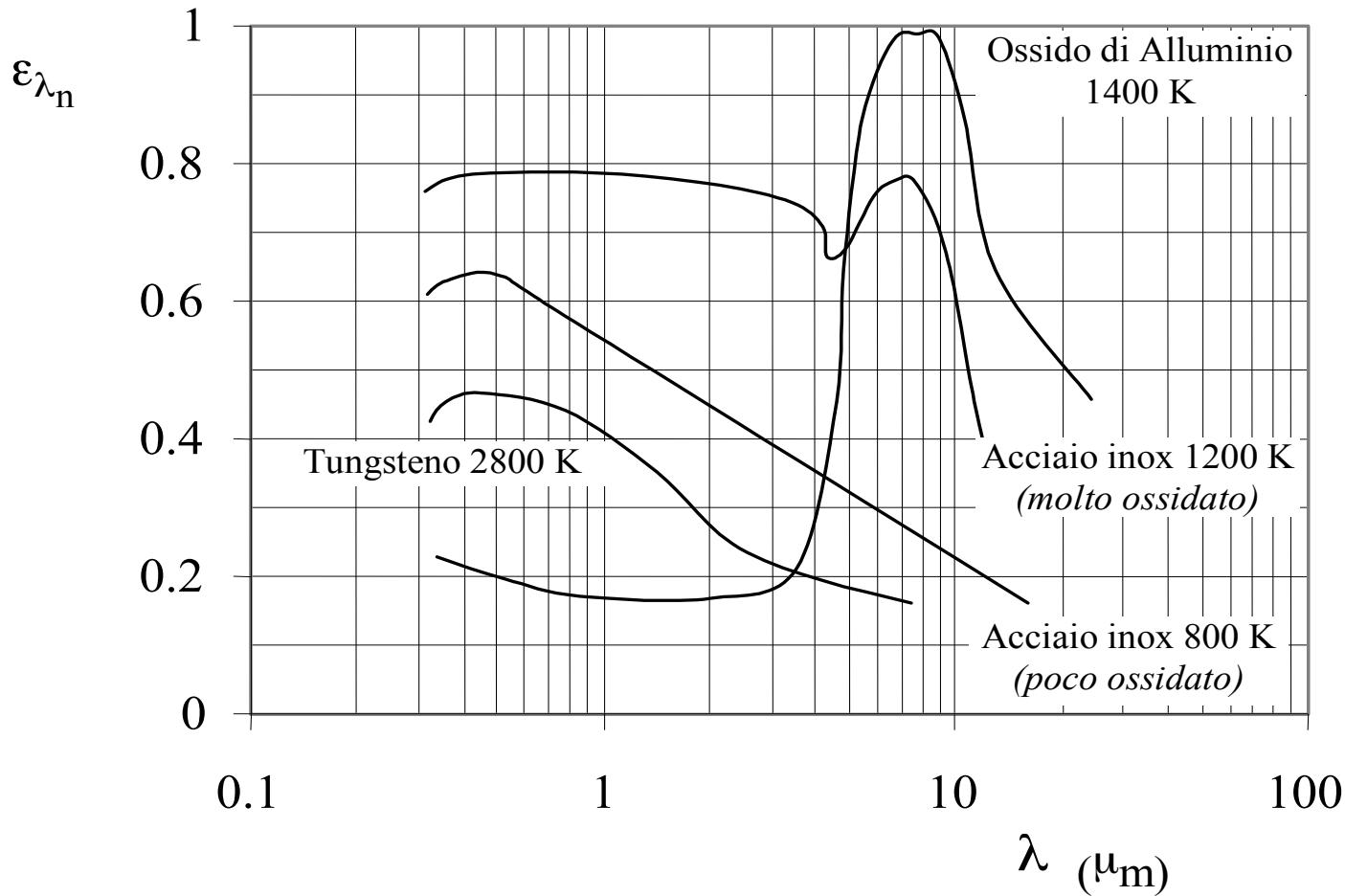
SUPERFICIE GRIGIA:

Le sue proprietà risultano indipendenti dalla lunghezza d'onda.

Emissività di superfici reali

<i>Metallo lappato</i>	0.01	-	0.02
<i>Metallo lucidato</i>	0.05	-	0.13
<i>Metallo</i>	0.1	-	0.4
<i>Metallo ossidato</i>	0.22	-	0.7
<i>Ceramica</i>	0.4	-	0.8
<i>Grafite</i>	0.75	-	0.95
<i>Vetro</i>	0.8	-	0.95
<i>Acqua, pelle</i>	0.9	-	0.97
<i>Vernice speciale</i>	0.92	-	0.99

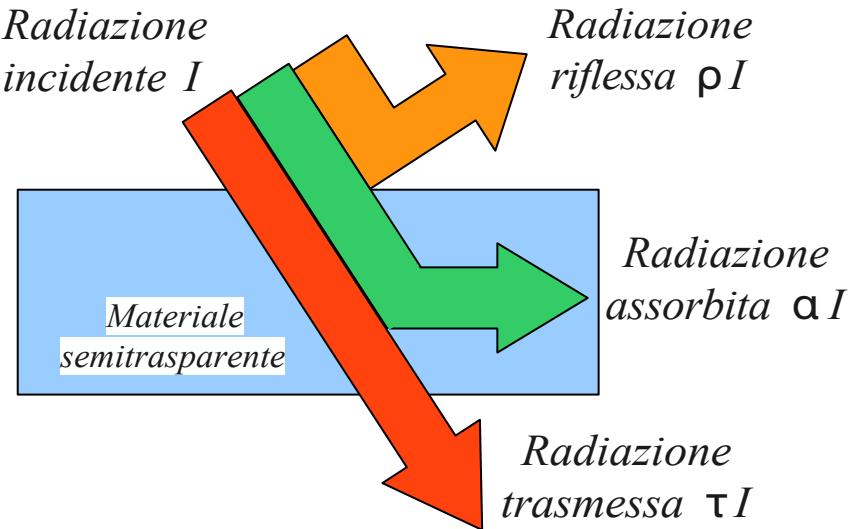
Emissività di superfici reali



Coefficienti

Tutti i corpi emettono continuamente radiazione in relazione alla loro emissività.

Quando la radiazione colpisce una superficie, parte di essa è **ASSORBITA**, parte è **RIFLESSA** e la restante parte, se c'è, viene **TRASMESSA**.



Coefficiente di assorbimento

$$\alpha = \frac{I_{assorbita}}{I_{incidente}} = \frac{I_{ass}}{I}$$

Coefficiente di riflessione

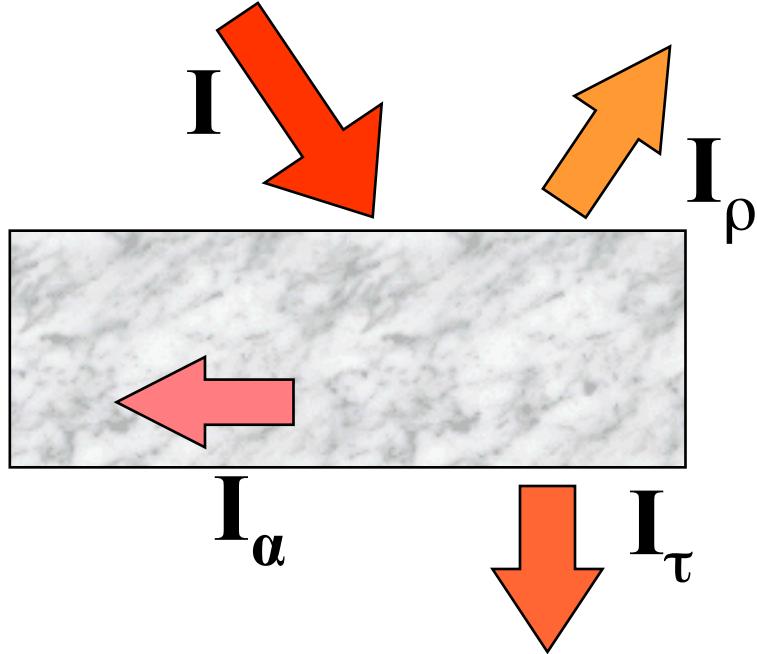
Coefficiente di trasmissione

Sussistono inoltre le seguenti relazioni:

$\alpha + \rho + \tau = 1$ per superfici trasparenti.

$\alpha + \rho = 1$ per superfici opache.

Analisi di una superficie esposta



$$\left\{ \begin{array}{l} I = I\rho + I\tau + I\alpha \\ 1 = \frac{I\rho}{I} + \frac{I\tau}{I} + \frac{I\alpha}{I} \\ 1 = \rho + \tau + \alpha \end{array} \right.$$

corpo opaco:

$$\tau = 0$$

corpo trasparente:

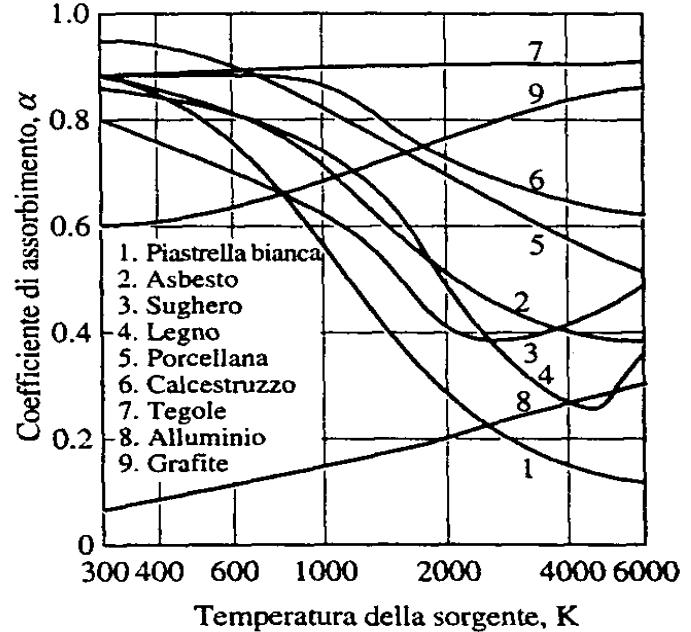
$$\tau = 0$$

superficie speculare:

$$\rho = 1$$

Coefficiente di assorbimento

Contrariamente all'emissività, il coefficiente di assorbimento di un materiale risulta praticamente indipendente dalla temperatura della superficie, ma dipendente dalla temperatura della sorgente.



Ad esempio il coefficiente di assorbimento di un tetto in cemento di un edificio è circa 0,6 per la radiazione solare (5762 K) e 0,9 per radiazioni provenienti da alberi e edifici circostanti.

Coefficiente di assorbimento

LEGGE DI KIRCHOFF

Coefficiente di assorbimento ed emissività tendono a uguagliarsi quando la differenza di temperatura fra emettitore e ricevente tende ad annullarsi

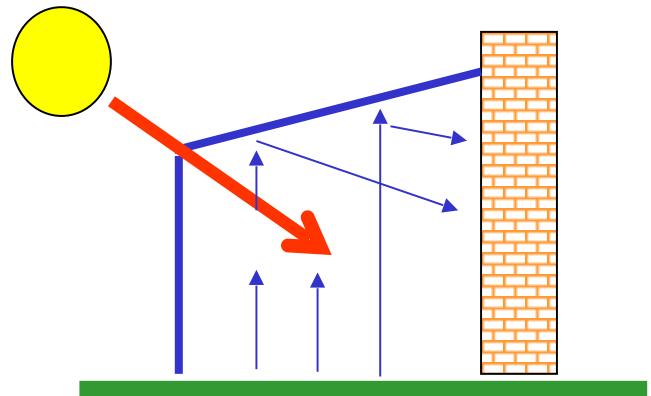
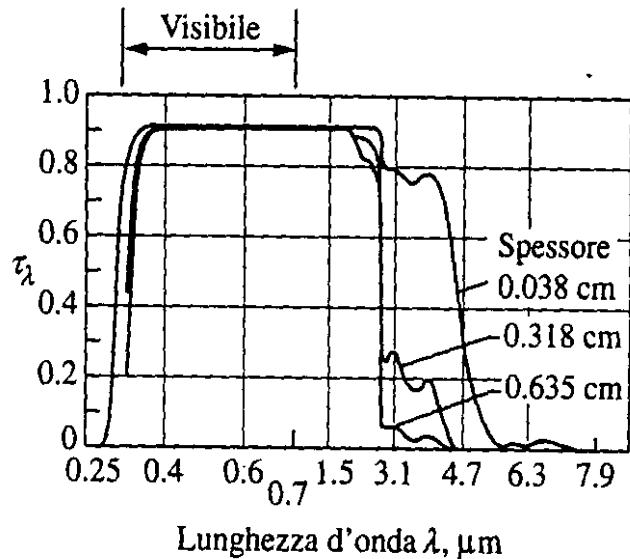
$$\alpha = \varepsilon$$

(Da ritenersi valida quando la differenza di temperatura non supera i 100 K)

Coefficiente di trasmissione ad effetto serra

All'interno di una serra, in presenza di una radiazione solare diretta, in inverno si raggiungono delle temperature superiori rispetto a quelle dell'ambiente esterno.

La serra si comporta come una trappola di calore



La spiegazione di questo fenomeno, meglio noto come “effetto serra”, sta nell’andamento della curva del coefficiente di trasmissione del vetro. Il vetro trasmette il 90% di radiazione nel campo del visibile e risulta praticamente opaco alla radiazione nella regione infrarossa dello spettro elettromagnetico ($\lambda > 3 \text{ mm}$). L’effetto serra si verifica pure su scala più vasta sulla terra

Radiazione solare atmosferica

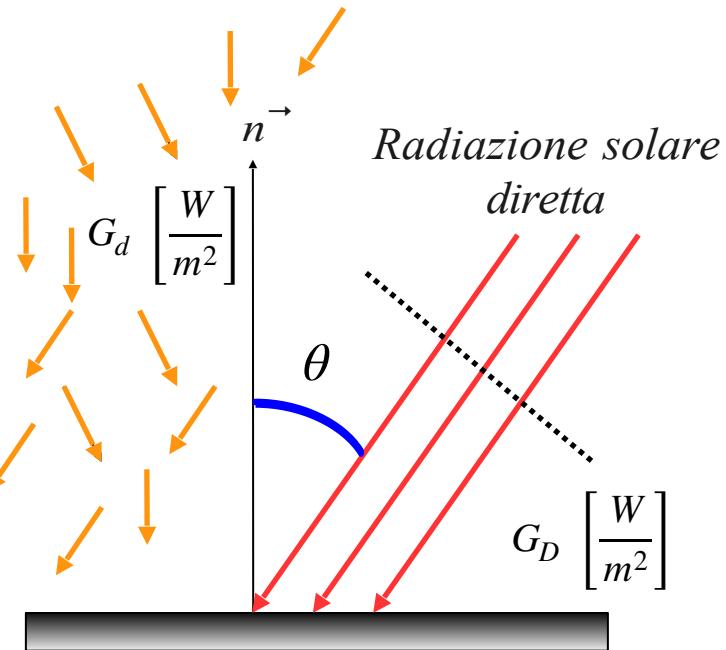
Il sole è la sorgente primaria di energia. L'energia proveniente dal sole, detta energia solare, raggiunge il suolo sotto forma di onde elettromagnetiche dopo aver attraversato l'atmosfera che funge da filtro.

- **T SUPERFICIE SOLARE:** 6000 K (considerando il sole un corpo nero)
- **COSTANTE SOLARE:** Rappresenta la potenza della radiazione solare che incide su di una superficie normale ai raggi solari all'esterno dell'atmosfera quando la terra è alla sua distanza media dal sole. I_s : **1353 W/m²**

NB:

- La radiazione solare disponibile al suolo in una giornata serena si riduce a meno di 1000 W/m².
- L'energia solare che raggiunge la terra (superficie terrestre) ha lunghezza d'onda quasi tutta compresa tra 0,3 e 2,5 μm.

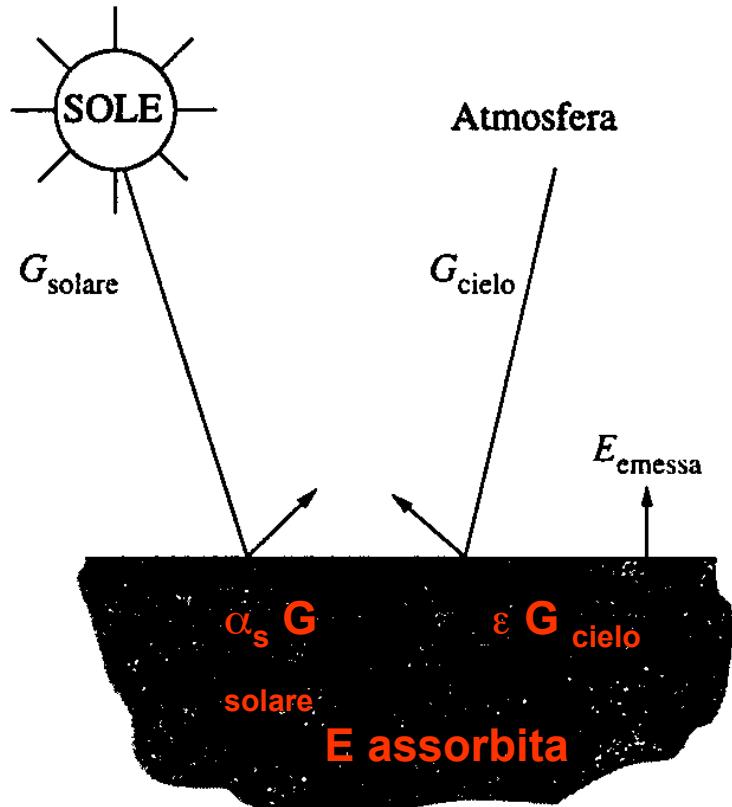
Radiazione solare atmosferica



Passando attraverso l'atmosfera,
la radiazione solare si attenua, si
DIFFONDE ed è parzialmente
RIFLESSA.

Sia la radiazione diretta che
quella diffusa quando incidono
sulla superficie di un corpo
vengono in parte riflesse, in parte
assorbite e in parte trasmesse.

Radiazione solare atmosferica



$$\dot{q}_{netta, irr} = \alpha_s G_{solare} + \alpha_s G_{cielo} - \varepsilon \sigma T_s^4$$

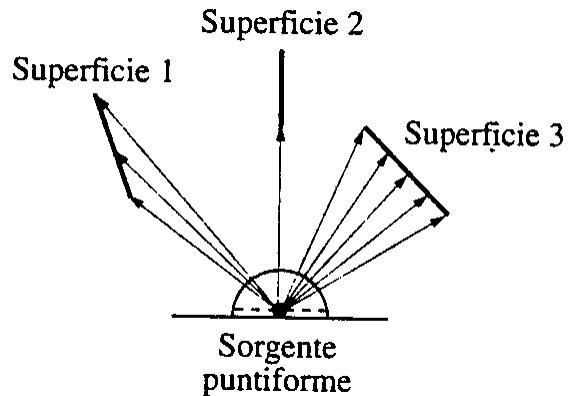
Radiazione solare atmosferica

	α_s	ε	
Alluminio lucido	0,09	0,03	
Alluminio anodizzato	0,14	0,84	
Alluminio in foglio	0,15	0,05	
Rame lucido	0,18	0,03	
Rame anodizzato	0,65	0,75	
Acciaio inox lucido	0,37	0,60	
Acciaio inox opaco	0,50	0,21	
Calcestruzzo	0,60	0,88	
Marmo bianco	0,46	0,95	
Laterizio rosso	0,63	0,93	
Asfalto	0,90	0,90	
Vernice nera	0,97	0,97	
Vernice bianca	0,14	0,93	
Neve	0,28	0,97	
Pelle umana	0,62	0,97	

Confronto tra il
coefficiente di
assorbimento solare
 α_s e l'emissività ε a
temperatura
ambiente.

Il fattore di vista

La trasmissione di calore per irraggiamento tra superfici dipende dall'orientazione relativa delle superfici, dalle loro proprietà radiative, dalle loro temperature.



Scambio termico per irraggiamento tra superfici, in funzione del fattore di vista che tiene conto dell'orientamento reciproco delle superfici.

Per tenere conto dell'orientamento si definisce un nuovo parametro detto **fattore di vista (o di forma, o di configurazione o di angolo)**. Il fattore di vista tra una superficie i e una superficie j si indica $F_{i \rightarrow j}$ e si definisce “Frazione della radiazione emessa dalla superficie i che incide direttamente sulla superficie j”.

$F_{i \rightarrow j} = 0$: Le superfici i e j non sono in vista tra loro

$F_{i \rightarrow j} = 1$: La superficie j circonda completamente la i, per cui tutta la radiazione emessa da i è intercettata da j.

Regole del fattore di vista

REGOLA DI RECIPROCITÀ:

I fattori di vista $F_{i \rightarrow j}$ e $F_{j \rightarrow i}$ sono uguali solo se le aree delle superfici cui si riferiscono sono uguali.

$$F_{i \rightarrow j} = F_{j \rightarrow i} \text{ quando } A_i = A_j \quad F_{i \rightarrow j} \neq F_{j \rightarrow i} \text{ quando } A_i \neq A_j$$
$$A_i F_{i \rightarrow j} = A_j F_{j \rightarrow i}$$

REGOLA DELLA SOMMA:

Per il principio di conservazione dell'energia, poiché tutta la radiazione emessa dalla superficie i di una cavità deve essere intercettata dalle superfici della cavità stessa, si ha che:

La somma dei fattori di vista della superficie i di una cavità verso tutte le superfici della cavità è uguale a 1

$$\sum_{j=1}^n F_{i \rightarrow j} = 1$$

Scambio termico tra superfici

Ipotesi adottate:

- radiatori diffusi
- radiazione incidente diffusa
- corpi neri o grigi

Convenzioni adottate:

$q_{1 \rightarrow 2}$	Potenza termica per unità di superficie emessa dalla superficie 1 che incide sulla superficie 2
q_{1-2}	Potenza termica per unità di superficie emessa dalla superficie 1 che viene assorbita dalla superficie 2
$q_{1,2}$	Potenza termica netta per unità di superficie scambiata tra la superficie 1 e la superficie 2

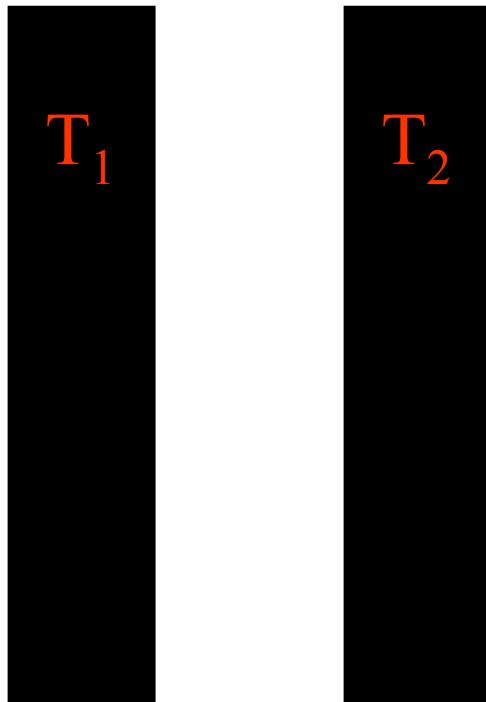
$$q_{1-2} = \alpha q_{1 \rightarrow 2}$$

$$q_{1,2} = q_{1-2} - q_{2-1} = -q_{2,1}$$

Irraggiamento

Scambio termico tra superfici (irraggiamento)

- Caso A: *Superfici piane parallele indefinite nere*

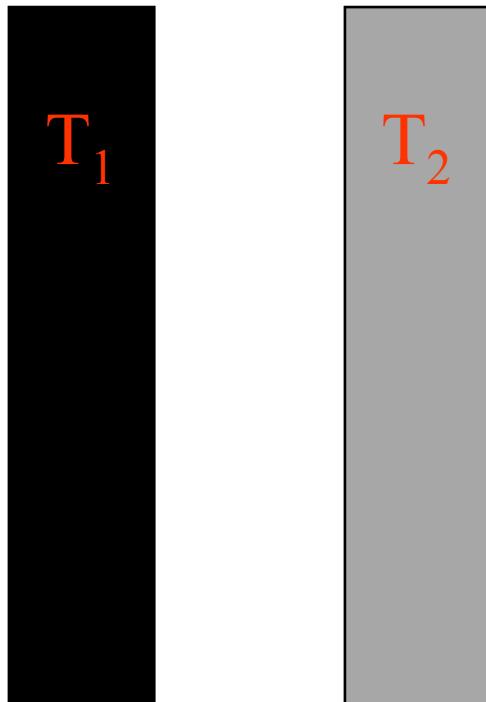


Potenza termica netta per unità di superficie scambiata tra la superficie 1 e la superficie 2

Irraggiamento

Scambio termico tra superfici (irraggiamento)

- Caso B: Superfici piane parallele indefinite nera-grigia:

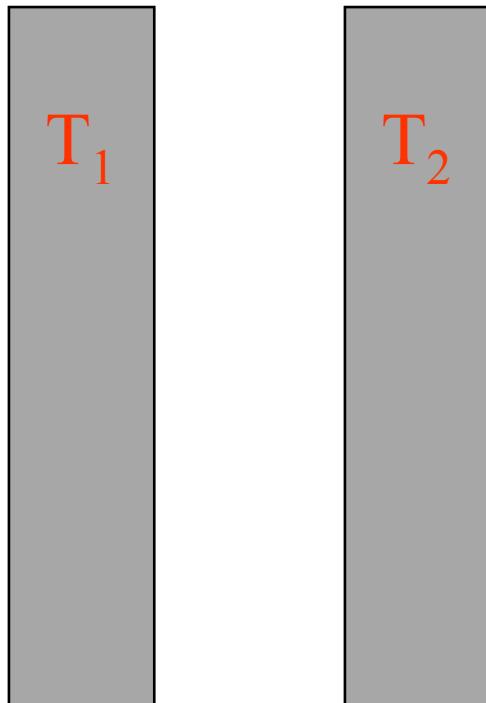


Potenza termica netta per unità di superficie scambiata tra la superficie 1 e la superficie 2

Irraggiamento

Scambio termico tra superfici (irraggiamento)

- Caso C: Superfici piane parallele indefinite grigia-grigia:

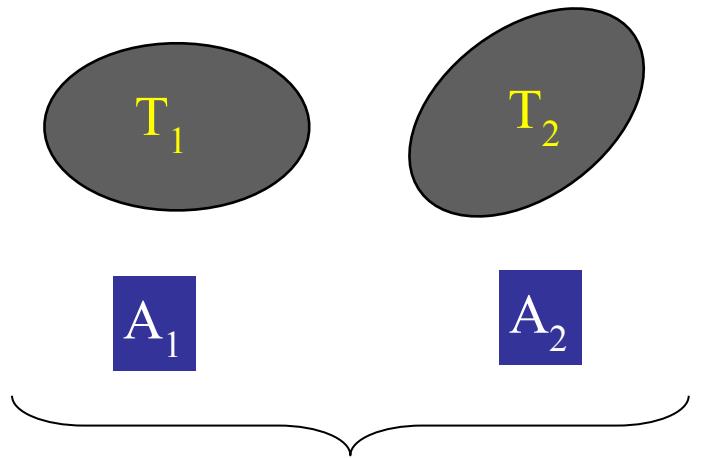


Potenza termica netta per unità di superficie scambiata tra la superficie 1 e la superficie 2

Irraggiamento

Scambio termico tra superfici (irraggiamento)

- Caso D: Superfici nere:



Potenza termica netta per unità di superficie scambiata tra la superficie 1 e la superficie 2

$$\dot{Q}_{1,2} = A_1 F_{12} \sigma_0 T_1^4 - A_2 F_{21} \sigma_0 T_2^4$$

$$A_1 F_{12} = A_2 F_{21} \quad \rightarrow \quad \text{Regola di reciprocità}$$

Irraggiamento

Bilancio termico di superficie grigia opaca:

$$J_i = E_i + \rho I_i$$

radiosità

radiazione emessa

radiazione riflessa

$\varepsilon = \alpha$

$\alpha + \rho = 1$

```
graph TD; A[radiosità] --> E[J_i = E_i + ρ I_i]; E --> B[radiazione emessa]; E --> C[radiazione riflessa]; D["ε = α"]; E["α + ρ = 1"]
```

Potenza termica netta uscente dalla superficie i :

$$\dot{Q}_i = A_i (J_i - I_i)$$

radiazione che abbandona i

radiazione incidente su i

```
graph TD; A[radiazione che abbandona i] --> B["dot{Q}_i = A_i (J_i - I_i)"]; B --> C[radiazione incidente su i]
```

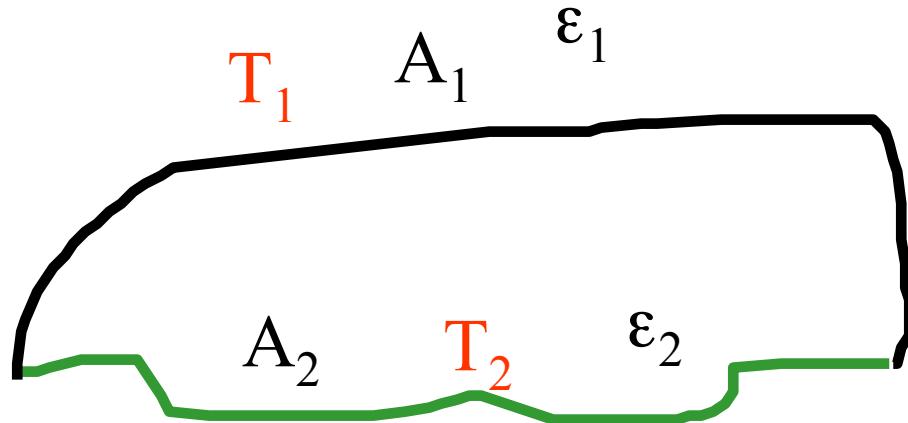
Bilancio termico di superficie grigia

$$\dot{Q}_i = A_i \left(J_i - \frac{J_i - \varepsilon_i E_{in}}{1 - \varepsilon_i} \right) = \frac{E_{in} - J_i}{\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i A_i}}$$



$\frac{1 - \varepsilon_i}{\varepsilon_i A_i}$
resistenza *superficiale*
all'irraggiamento

Superfici grigie formanti una cavità

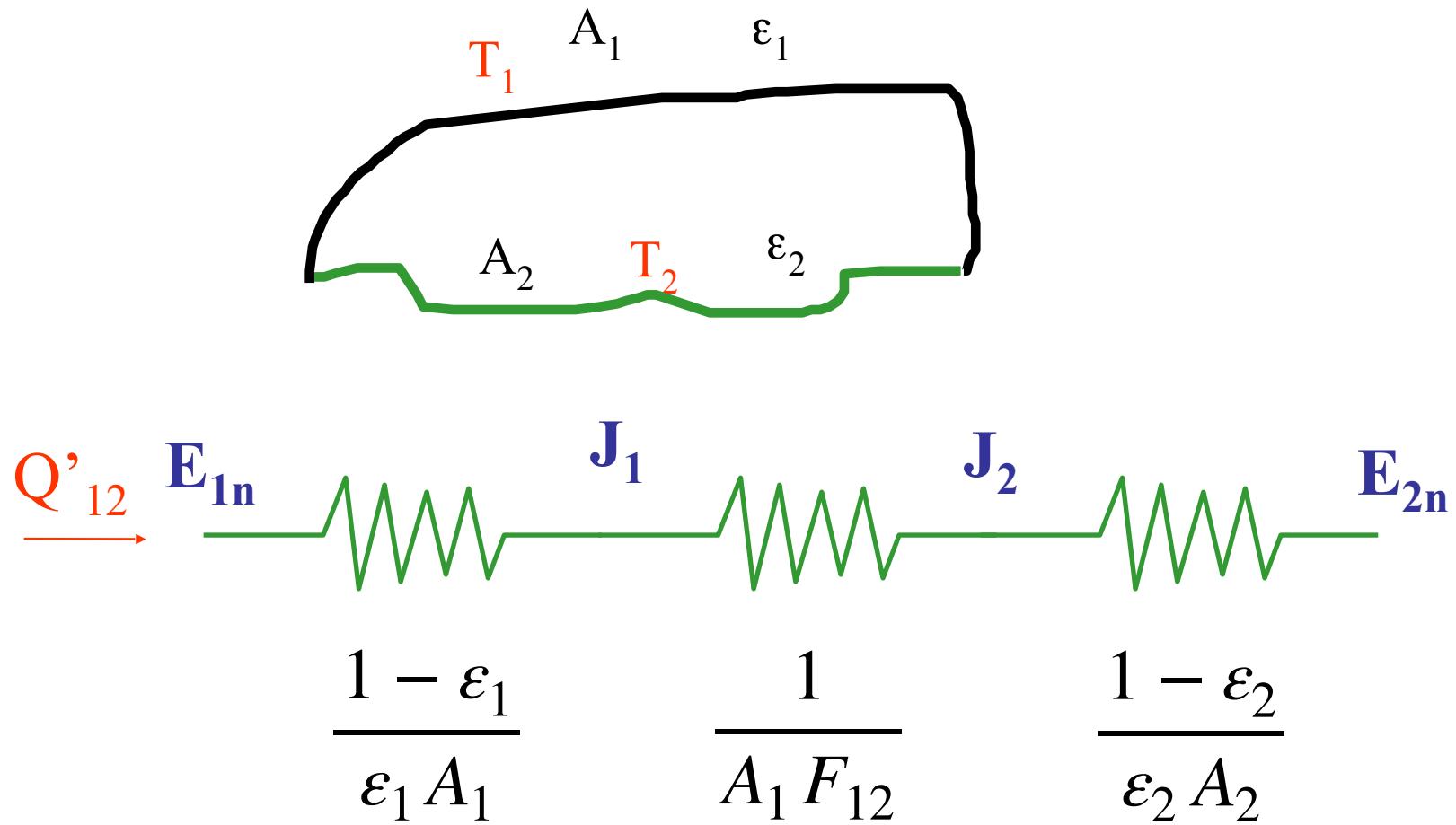


$$\frac{1}{A_i F_{12}}$$

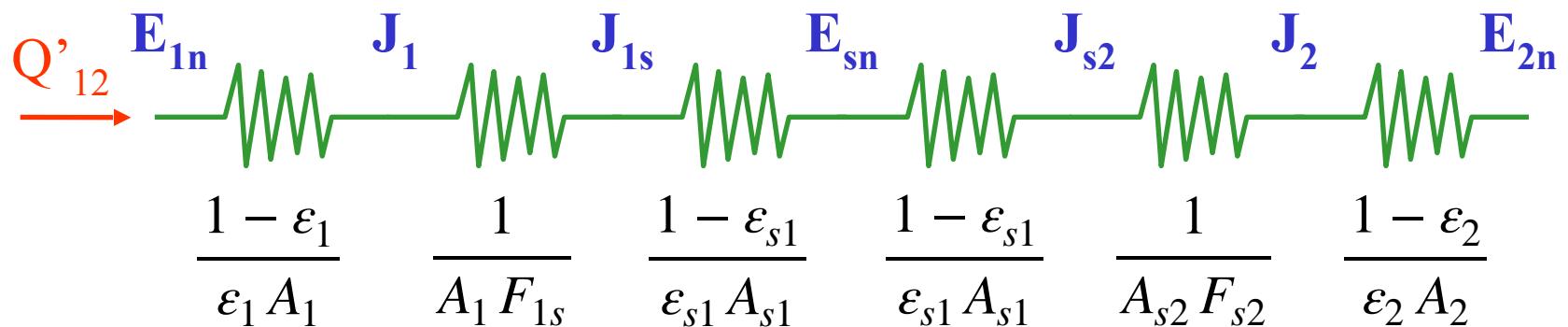
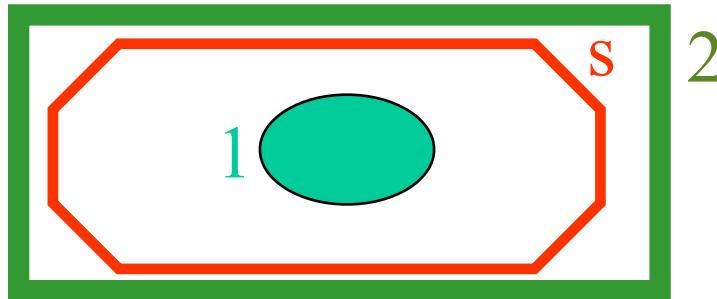
resistenza *spaziale*
alla radiazione

$$\dot{Q}_{1,2} = \frac{\sigma_0 (T_1^4 - T_2^4))}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}}$$

Analogia Elettrica



Esempio



$$\dot{Q}_{1,2} = \frac{\sigma_0 (T_1^4 - T_2^4))}{\frac{1 - \varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{1s}} + \frac{1 - \varepsilon_{s1}}{\varepsilon_{s1} A_{s1}} + \frac{1 - \varepsilon_{s2}}{\varepsilon_{s2} A_{s2}} + \frac{1}{A_{s2} F_{s2}} + \frac{1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}}$$

Note per lo studente

Note per lo studente

Note per lo studente

Note per lo studente