



**POLITECNICO**  
MILANO 1863

## Lezione 12 - Irraggiamento

**Corso di Fisica Tecnica**  
**a.a. 2019-2020**

***Prof. Gaël R. Guédon***  
Dipartimento di Energia, Politecnico di Milano

## Obiettivi della lezione

- Introdurre la fenomenologia della **radiazione termica**
- Introdurre le **proprietà dei corpi**
- Analizzare i modelli di **corpo nero** e **corpo grigio**
- Determinare lo **scambio termico** tra corpi neri e grigi

## ***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.***

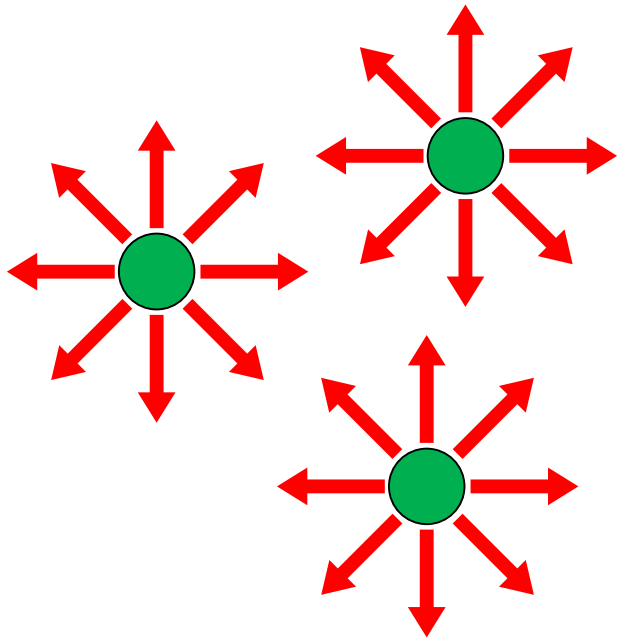
***Distingueremo tra***

- ***Radiazione emessa***
- ***Radiazione incidente***

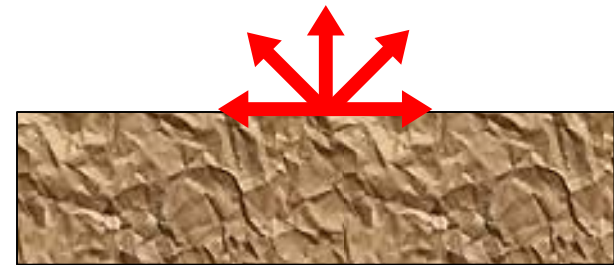
## **FENOMENOLOGIA**

- Un corpo a **temperatura diversa da 0 K** emette energia sotto forma di radiazione elettromagnetica
- E' sempre un **fenomeno di volume** in quanto entrano in gioco anche gli strati non superficiali della materia
- Nei **solidi** e nei **liquidi** però si tratta il fenomeno come **superficiale**, perché le radiazioni emesse dagli strati profondi sono rapidamente assorbite nell'intorno dell'elemento emittente a causa della **non trasparenza (opacità)** o **ridotta trasparenza** del mezzo
- La radiazione si propaga nel **vuoto** o in un **mezzo** di trasmissione trasparente

## FENOMENOLOGIA



**Fenomeno volumetrico:**  
*es. gas, vetro, mezzi trasparenti*



**Fenomeno superficiale:**  
*es. solidi, mezzi non trasparenti*

## ***FENOMENOLOGIA***

➤ Le onde elettromagnetiche sono caratterizzate da:

- **Velocità di propagazione**  $\bar{c}$  in un mezzo di **indice di rifrazione**  $n$ :

$$\bar{c} = \frac{c}{n}$$

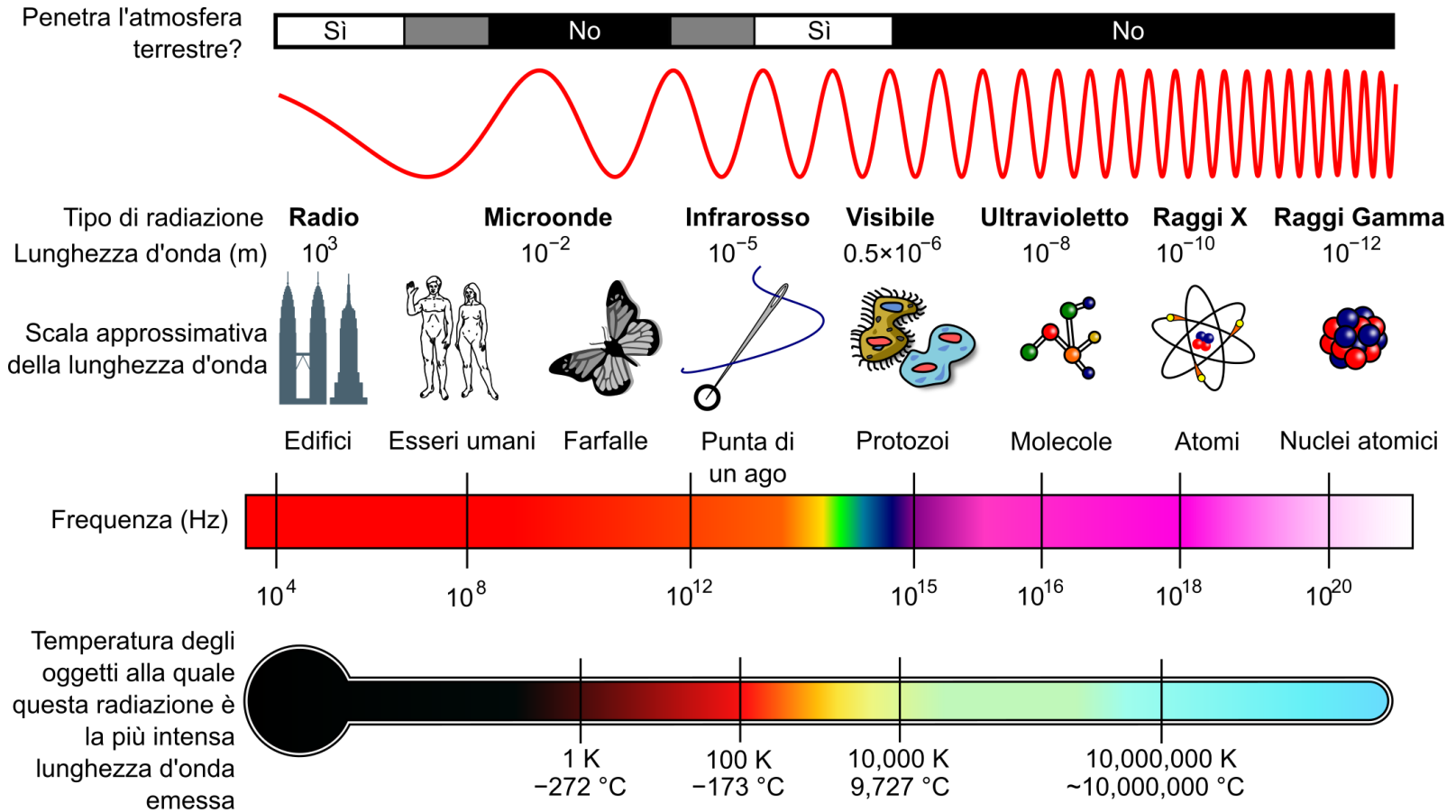
$c = 2.998 \cdot 10^8$  m/s: velocità della luce nel vuoto

- **Frequenza** della radiazione:  $\nu$

- **Lunghezza d'onda**  $\lambda$ :

$$\lambda = \frac{\bar{c}}{\nu}$$

## SPETTRO ELETTROMAGNETICO



## ***RADIAZIONE TERMICA***

- Si dicono «**radiazioni termiche**» le radiazioni emesse dai corpi per il solo fatto di essere a temperatura diversa dallo zero assoluto: esse appartengono alla più vasta categoria delle radiazioni elettromagnetiche.
- La **temperatura**, causa di eccitazione dei costituenti elementari (elettroni) dei corpi, provoca **l'emissione di radiazioni in tutto lo spettro di lunghezze d'onda**, ma con intensità centrata prevalentemente nel campo compreso tra  $10^{-2} \mu m$  (ultravioletto) e  $10^2 \mu m$  (infrarosso)
- All'aumentare della temperatura, aumenta l'emissione di radiazione termica



## COMPONENTI DELLA RADIAZIONE TERMICA

### ➤ Radiazione infrarossa:

*Si tratta della componente di radiazione termica dei corpi a bassa temperatura e ricopre lo spettro compreso tra*

$$0.76 \mu m < \lambda < 100 \mu m$$

### ➤ Radiazione visibile:

*Si tratta della componente visibile dello spettro elettromagnetico ed è compresa tra*

$$0.40 \mu m < \lambda < 0.76 \mu m$$

### ➤ Radiazione ultravioletta:

*Si tratta della componente di radiazione a bassa lunghezza d'onda della radiazione termica ed è compresa tra*

$$0.01 \mu m < \lambda < 0.40 \mu m$$

## ***RADIAZIONE INFRAROSSA***

- Completamente inglobata dalla radiazione termica
- La radiazione infrarossa è la radiazione emessa dai corpi che si trovano a bassa temperatura. Solo a temperatura 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 VISIBILE***

- Completamente inglobata dalla radiazione termica
- 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  $0.40 \mu m < \lambda < 0.44 \mu m$
  - Blu  $0.44 \mu m < \lambda < 0.49 \mu m$
  - Verde  $0.49 \mu m < \lambda < 0.54 \mu m$
  - Giallo  $0.54 \mu m < \lambda < 0.60 \mu m$
  - Arancio  $0.60 \mu m < \lambda < 0.63 \mu m$
  - Rosso  $0.63 \mu m < \lambda < 0.76 \mu m$
  - Nero luce incidente completamente **assorbita**
  - Bianco luce incidente completamente **riflessa**

## ***RADIAZIONE ULTRAVIOLETTA***

- Parzialmente inglobata dalla radiazione termica
- 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 extraatmosferica
- 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 (ad es. api)

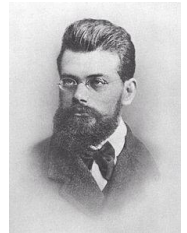
### ***CORPO NERO***

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

## 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*

$$E^n = \sigma_0 T^4 \quad [W/m^2]$$



Dove  $\sigma_0 = 5.67 \cdot 10^{-8} \quad [W/m^2 K^4]$  è la costante di Stefan-Boltzmann

- Il potere emissivo del corpo nero è proporzionale alla quarta potenza della temperatura assoluta

## **POTERE EMISSIVO MONOCROMATICO DEL CORPO NERO**

*La 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  $\lambda$***

*Per effettuare un calcolo quantitativo è necessario ricorrere ad una relazione nota come «legge della distribuzione di Planck»*

**LEGGE DELLA DISTRIBUZIONE DI PLANCK**

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

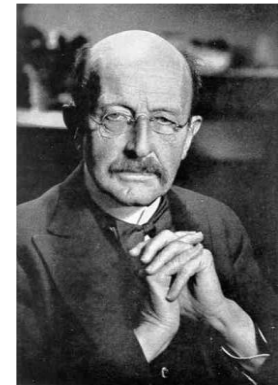
Dove:

$$C_1 = 3.742 \quad [W \cdot \mu m^4 / m^2]$$

$$C_2 = 1.439 \cdot 10^4 \quad [\mu m \cdot K]$$

$T$  = temperatura assoluta  $[K]$

$\lambda$  = lunghezza d'onda della radiazione emessa  $[\mu m]$

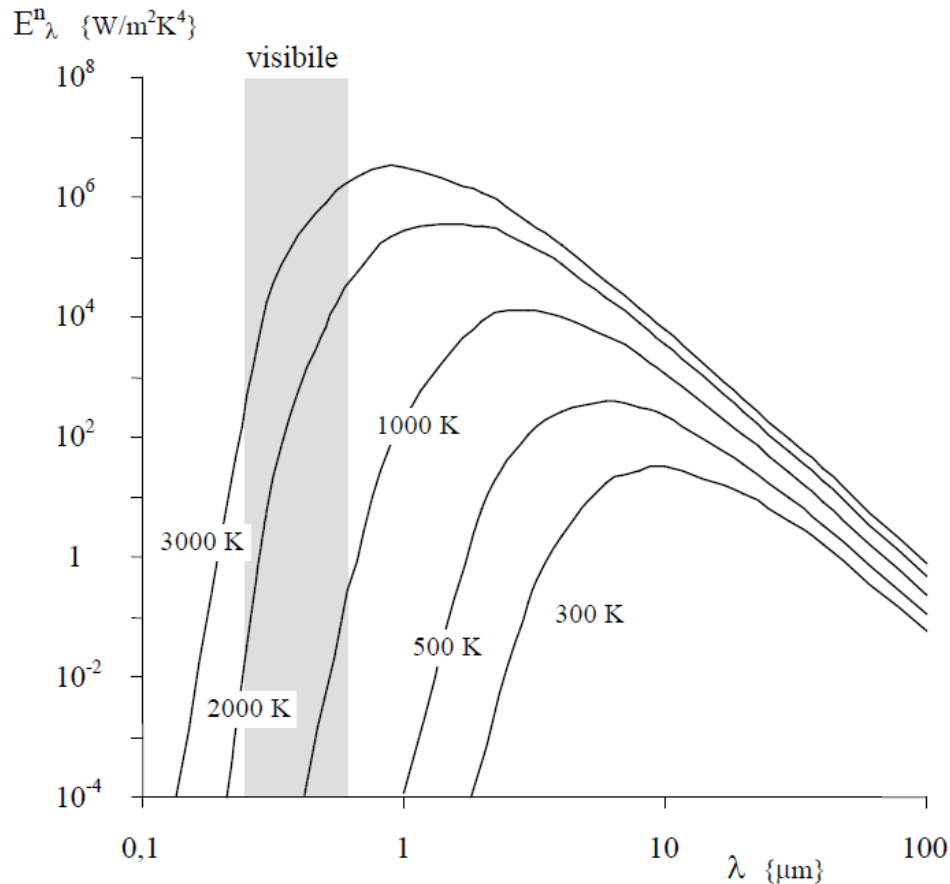


*L'integrale della potenza radiante emessa per una lunghezza d'onda da zero ad infinito definisce il potere emissivo del corpo nero alla temperatura  $T$ :*

$$\int_{\lambda}^{\infty} E_{\lambda}^n(\lambda, T) d\lambda = E^n = \sigma_0 T^4$$



## ***VARIAZIONE IN FUNZIONE DELLA TEMPERATURA***



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

## LEGGE DELLO SPOSTAMENTO O DI WIEN

- Osservando il grafico precedente si osserva che i picchi corrispondenti al massimo valore di  $E_{\lambda}^n$  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:

$$(\lambda T)_{\text{max potenza}} = 2897.8 \text{ } [\mu\text{m} \cdot \text{K}]$$



## LA BANDA DI EMISSIONE

- *In alcuni casi lo spettro di emissione della radiazione da parte della superficie avviene prevalentemente in intervalli particolari di lunghezza d'onda della radiazione (superfici selettive)*
- *In questi casi è utile poter determinare la frazione del potere emissivo che è contenuto in un certo intervallo di lunghezza d'onda o banda*
- *Per una determinata temperatura questa frazione, riferita ad un corpo nero, si esprime come rapporto tra la potenza emessa dal corpo nero nell'intervallo di lunghezza d'onda  $0 - \lambda$  ed il potere emissivo del corpo nero:*

$$F_{(0-\lambda)} = \frac{\int_0^\lambda E_\lambda^n d\lambda}{\sigma_0 T^4}$$

## LA BANDA DI EMISSIONE

- Si può dimostrare che  $F_{(0-\lambda)}$  sia solo funzione del prodotto  $\lambda T$  (tabulati)
- Calcolo della frazione della radiazione che cade in un intervallo  $\lambda_1 - \lambda_2$

$$F_{(\lambda_1-\lambda_2)} = F_{(0-\lambda_2)} - F_{(0-\lambda_1)}$$

$\lambda T$ ( $\mu\text{mK}$ )	$F_{(0 \rightarrow \lambda)}$	$\lambda T$ ( $\mu\text{mK}$ )	$F_{(0 \rightarrow \lambda)}$	$\lambda T$ ( $\mu\text{mK}$ )	$F_{(0 \rightarrow \lambda)}$
200	0.000000	4107	0.500000	11000	0.931890
400	0.000000	4500	0.564280	12000	0.945098
600	0.000000	5000	0.633747	15000	0.969981
800	0.000016	5500	0.690715	20000	0.980859
1000	0.000321	6000	0.737818	30000	0.994329
2000	0.066728	6500	0.776216	40000	0.997607
2500	0.161155	7000	0.808109	50000	0.998775
3000	0.273232	8000	0.856288	75000	0.999637
3500	0.382870	9000	0.890029	100000	0.999847
4000	0.480877	10000	0.914199		

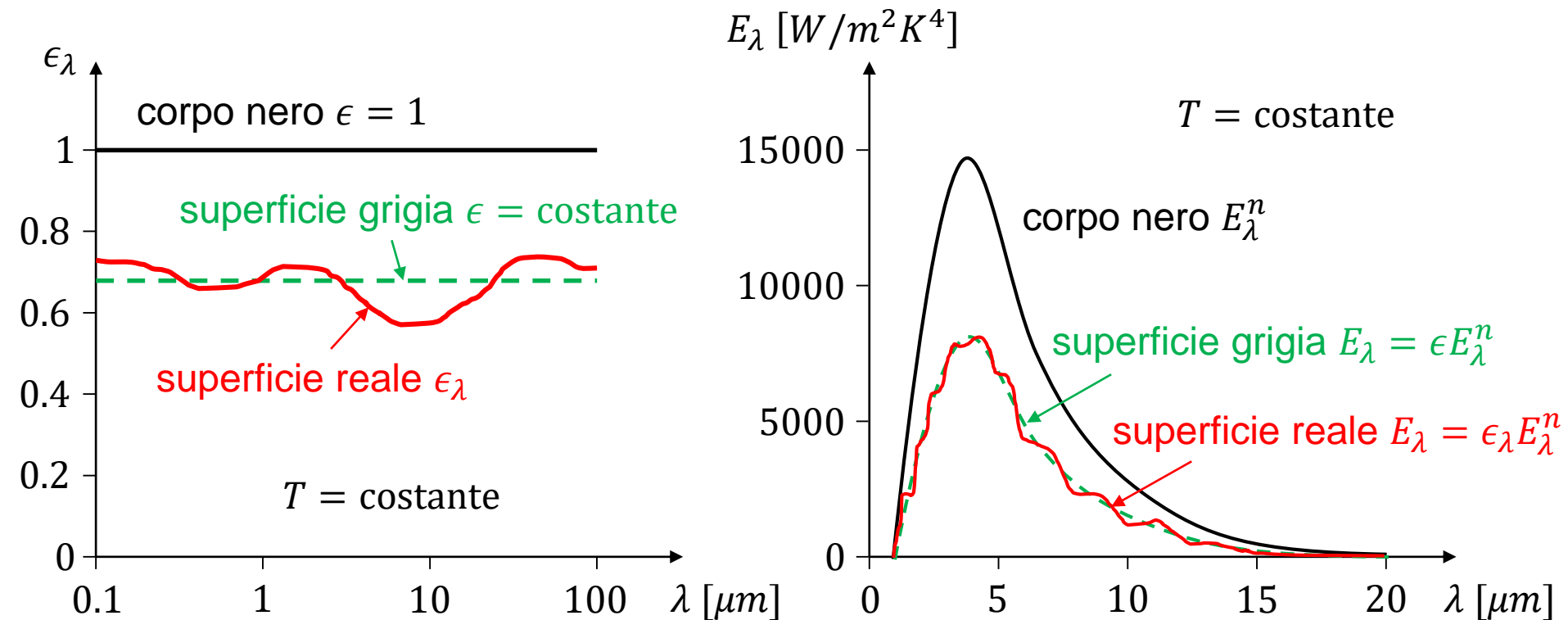
**EMISSIVITA'**

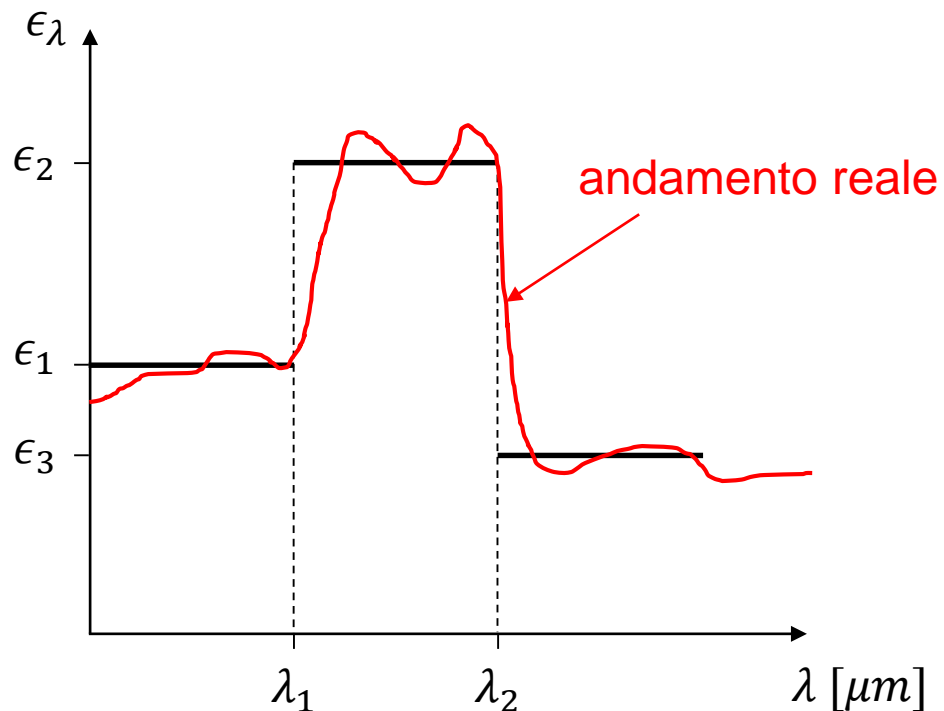
*L'emissività di una superficie è il rapporto tra la radiazione emessa dalla superficie stessa e la radiazione del corpo nero alla medesima temperatura.*

$$\epsilon(T) = \frac{E(T)}{E^n(T)} = \frac{E(T)}{\sigma_0 T^4}$$

*Dalla quale ovviamente segue che  $E(T) = \epsilon(T)\sigma_0 T^4$  [W/m<sup>2</sup>]*

- *Per il **corpo nero**  $\epsilon = 1$*
- *Per il **corpo grigio**  $\epsilon = \epsilon(T) < 1$   
(costante funzione solo della temperatura, ad es. non dipende da  $\lambda$ )*

**EMISSIVITA'**

**EMISSIVITA'**

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*

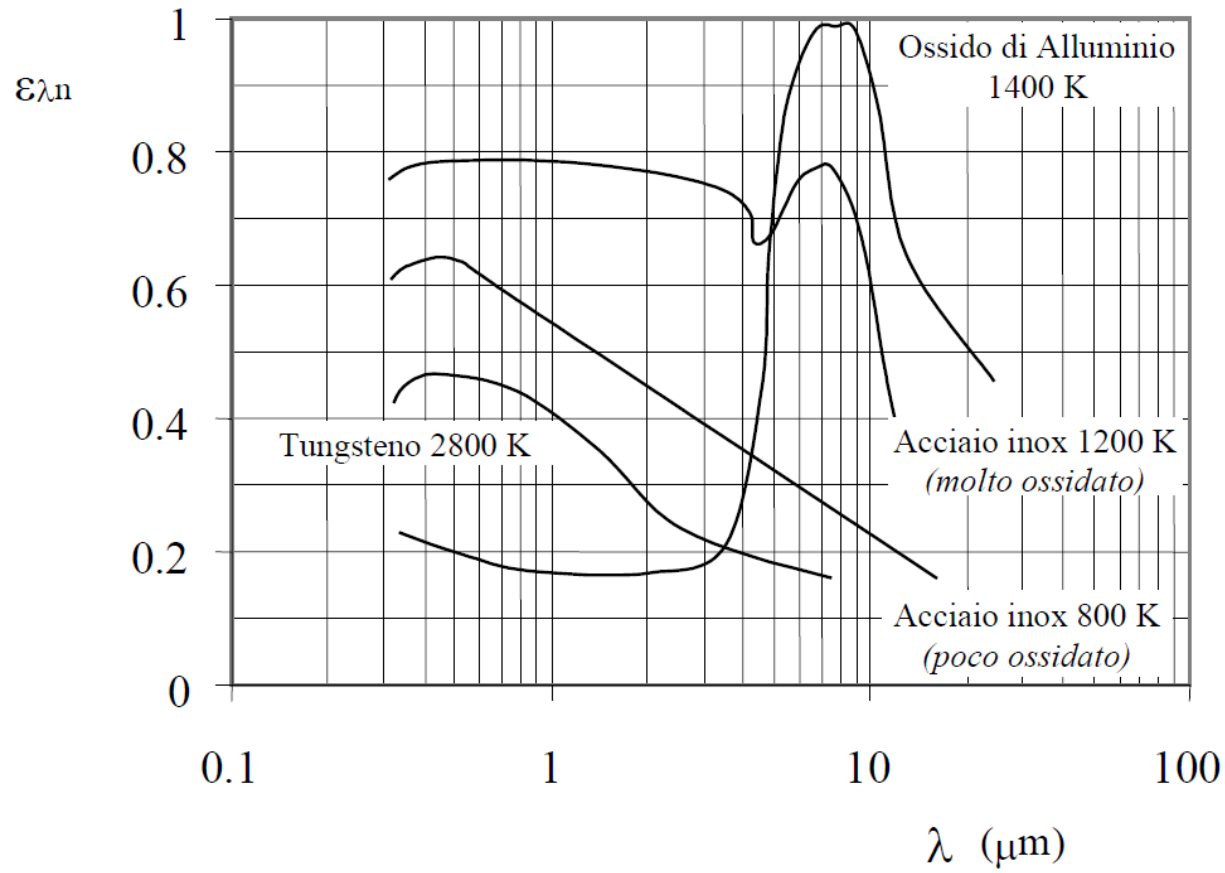
➤ ***SUPERFICIE GRIGIA:***

*Le sue proprietà risultano indipendenti dalla lunghezza d'onda*



## ***EMISSIVITA' DI SUPERFICI REALI***

<i>Metallo lappato</i>	0.01 ÷ 0.02
<i>Metallo lucidato</i>	0.05 ÷ 0.13
<i>Metallo</i>	0.10 ÷ 0.40
<i>Metallo ossidato</i>	0.22 ÷ 0.70
<i>Ceramica</i>	0.40 ÷ 0.80
<i>Grafite</i>	0.75 ÷ 0.95
<i>Vetro</i>	0.80 ÷ 0.95
<i>Acqua, pelle</i>	0.90 ÷ 0.97
<i>Vernice speciale</i>	0.92 ÷ 0.99

**EMISSIVITA' DI SUPERFICI REALI**

## RADIAZIONE INCIDENTE

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**.

radiazione  
incidente  $I$

frazione  
riflessa  $\rho I$

**Coefficiente di  
assorbimento**

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

**Coefficiente di  
riflessione**

$$\rho = \frac{I_{\text{riflessa}}}{I_{\text{incidente}}} = \frac{I_{\text{rifl}}}{I}$$

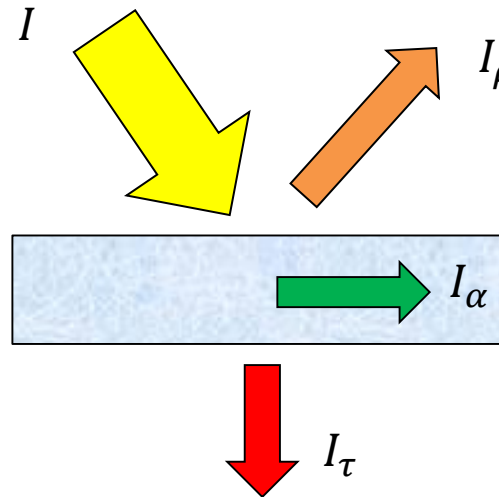
**Coefficiente di  
trasmissione**

$$\tau = \frac{I_{\text{trasmessa}}}{I_{\text{incidente}}} = \frac{I_{\text{tras}}}{I}$$

frazione  
assorbita  $\alpha I$

frazione  
trasmessa  $\tau I$

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

***RADIAZIONE INCIDENTE***

$$I = I_\rho + I_\alpha + I_\tau$$

**Corpo opaco:**  
 $\tau = 0$

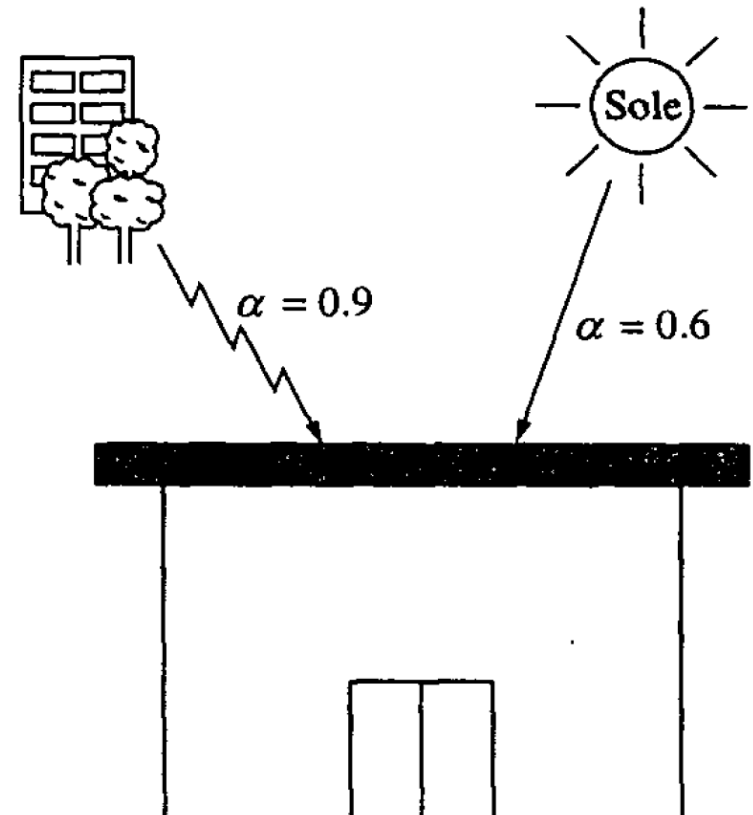
**Corpo trasparente:**  
 $\tau = 1$

**Superficie speculare:**  
 $\rho = 1$

## COEFFICIENTE DI ASSORBIMENTO

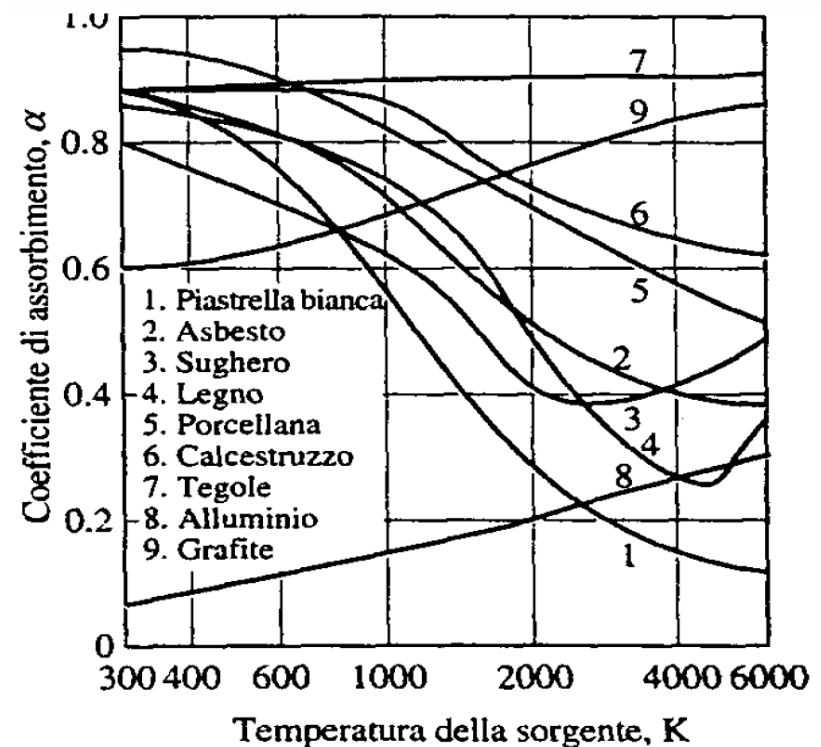
Contrariamente all'emissività, il coefficiente di **assorbimento** di un materiale risulta praticamente indipendente dalla temperatura della superficie, ma dipende dalla **temperatura della sorgente**.

*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

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



## **LEGGE DI KIRCHHOFF**

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

$$\alpha = \epsilon$$

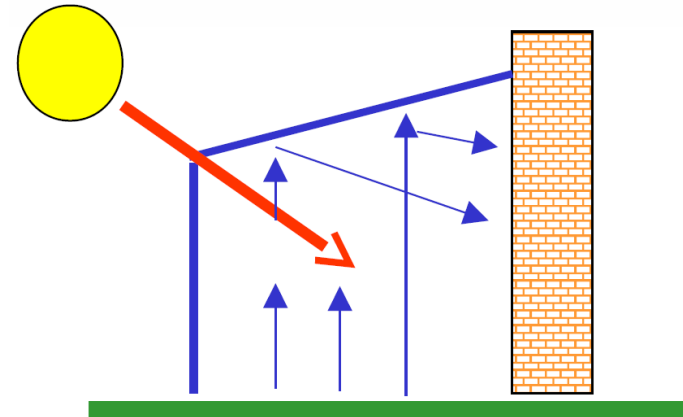
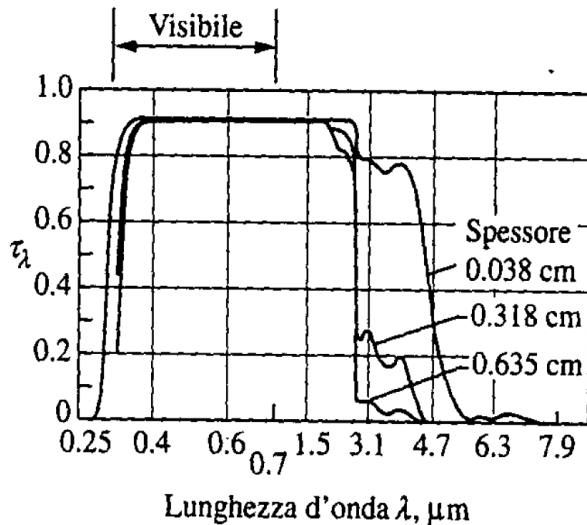
$$\alpha_{\lambda} = \epsilon_{\lambda}$$

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

*«Un buon assorbitore è anche un buon emettitore»*

## 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 ( $\lambda > 3 \mu\text{m}$ ). L'effetto serra si verifica pure su scala più vasta sulla terra



## **RADIAZIONE SOLARE ATMOSFERICA**

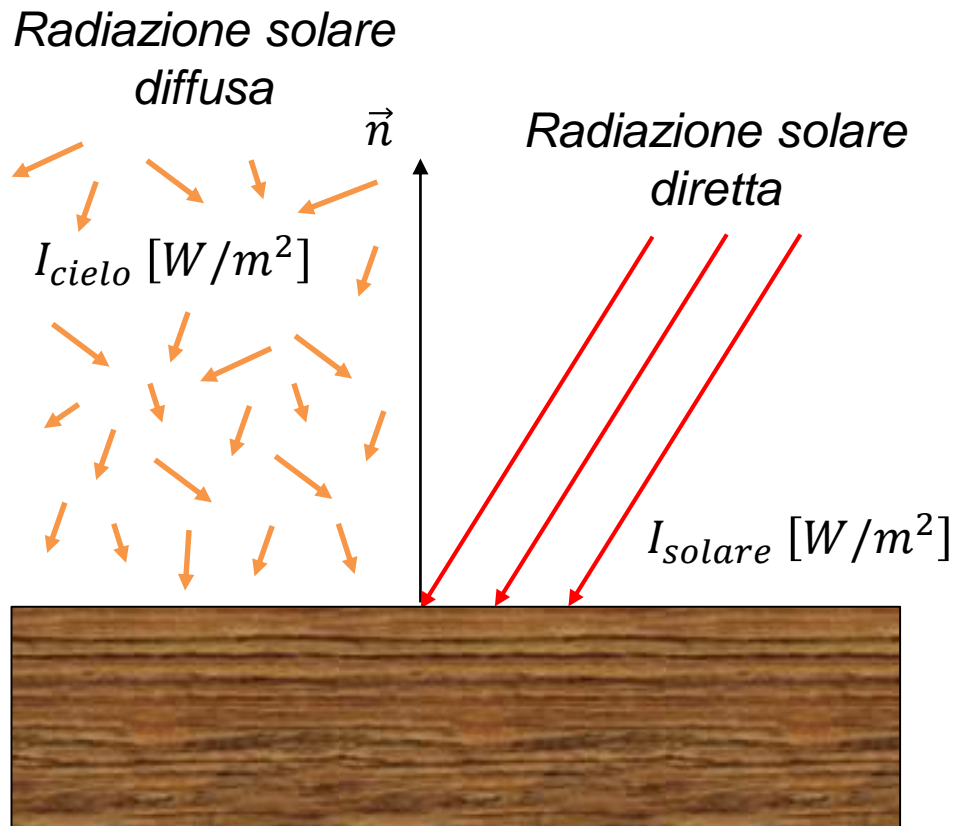
Il sole è la sorgente primaria di energia. L'energia proveniente dal sole, detta energia solare, raggiunge il suolo sotto forma di onde elettromagnetiche dopo aver attraversato l'atmosfera che funge da filtro.

- **$T$  SUPERFICIE SOLARE:** 5762 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  **$I_s = 1353 \text{ W/m}^2$**

N.B:

- La radiazione solare disponibile al suolo in una giornata serena si riduce a meno di  $1000 \text{ W/m}^2$
- L'energia solare che raggiunge la terra (superficie terrestre) ha lunghezza d'onda quasi tutta compresa tra 0.3 e  $2.5 \mu\text{m}$

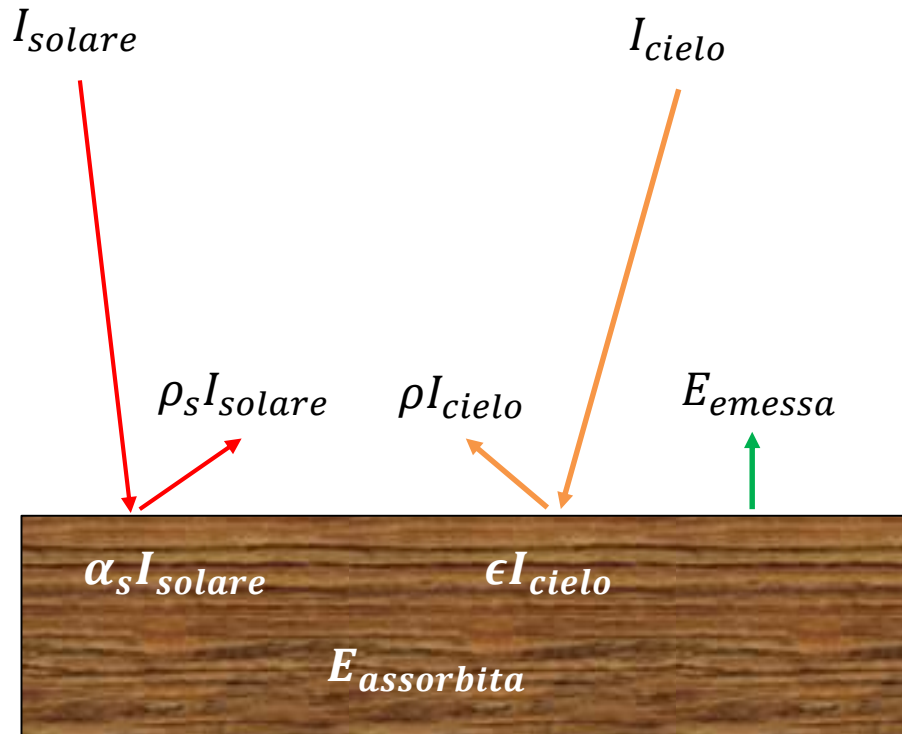
## **RADIAZIONE SOLARE ATMOSFERICA**



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

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

## RADIAZIONE SOLARE ATMOSFERICA



$$J_{netta,irr} = E_{assorbita} - E_{emessa}$$

$$J_{netta,irr} = \alpha_s I_{solare} + \alpha I_{cielo} - \epsilon \sigma_0 T_{suolo}^4$$

Legge di Kirchhoff applicabile per  $\alpha_{cielo}$

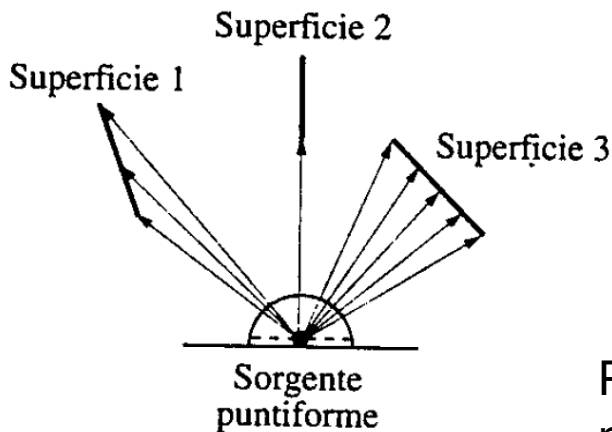
$$J_{netta,irr} = \alpha_s I_{solare} + \epsilon \sigma_0 (T_{cielo}^4 - T_{suolo}^4)$$

Superficie	$\alpha_s$	$\epsilon$
<i>Alluminio</i>		
Lucido	0.09	0.03
Anodizzato	0.14	0.84
<i>Rame</i>		
Lucido	0.18	0.03
Ossidato	0.65	0.75
<i>Acciaio inox</i>		
Lucido	0.37	0.60
Opaco	0.50	0.21
<i>Metalli placcati</i>		
ossido di nickel nero	0.92	0.08
cromo nero	0.87	0.09
Calcestruzzo	0.60	0.88
<i>Marmo bianco</i>	0.46	0.95
<i>Laterizio rosso</i>	0.63	0.93
<i>Asfalto</i>	0.90	0.90
<i>Vernice nera</i>	0.97	0.97
<i>Vernice bianca</i>	0.14	0.93
<i>Neve</i>	0.28	0.97
<i>Pelle umana</i>	0.62	0.97

Confronto tra il coefficiente di assorbimento solare  $\alpha_s$  e l'emissività  $\epsilon$  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

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 superficie  $i$ , per cui tutta la radiazione emessa da  $i$  è intercettata da  $j$

$$F_{i \rightarrow j} = \frac{J_{i \rightarrow j}}{J_i}$$

radiation incidente su  $j$  proveniente da  $i$

radiation complessiva emessa da  $i$

## IL FATTORE DI VISTA

### ➤ REGOLA DI RECIPROCITA':

*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*

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

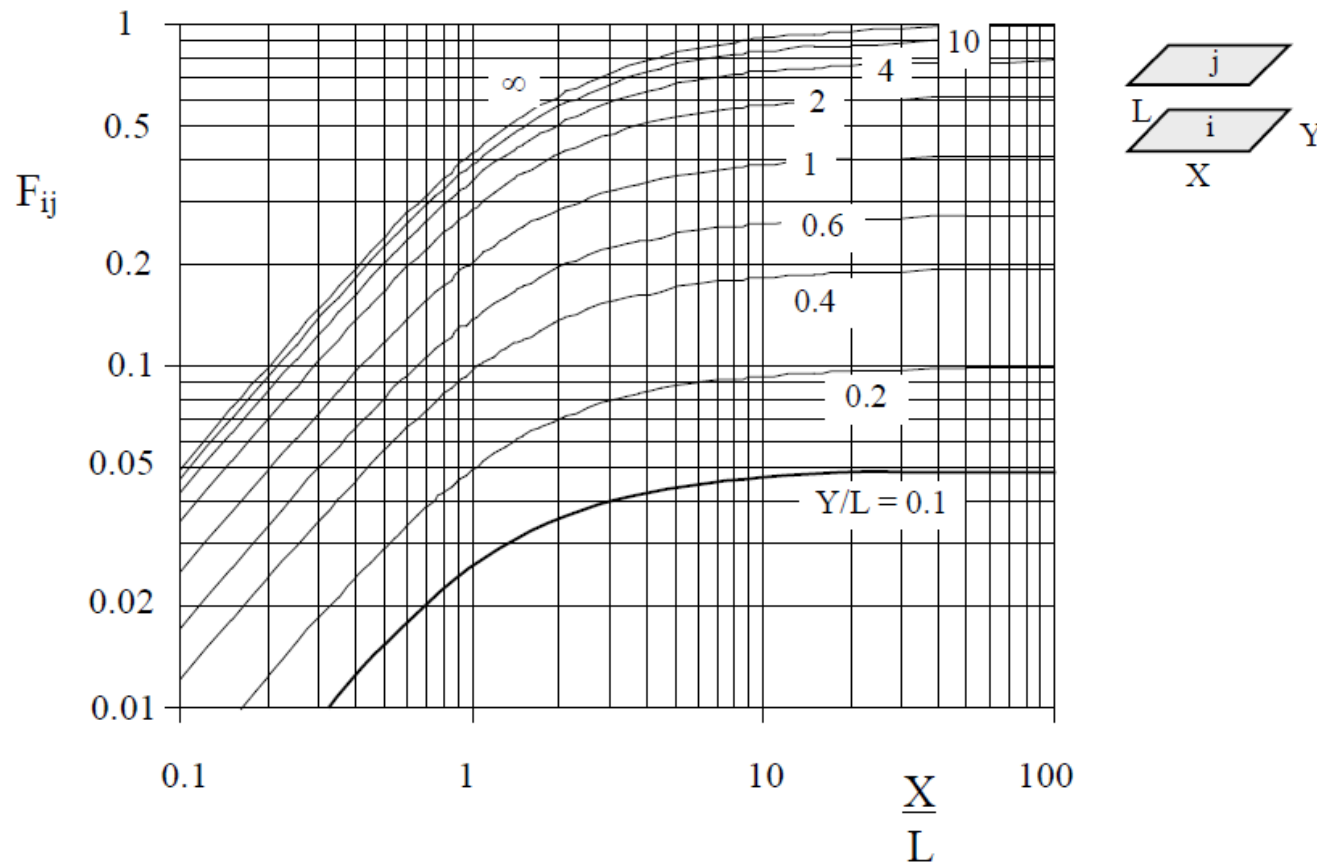
$$F_{i \rightarrow j} \neq F_{j \rightarrow i} \quad \text{quando } A_i \neq A_j$$

$$A_i F_{i \rightarrow j} = A_j F_{j \rightarrow i}$$

### ➤ REGOLA DELLA SOMMA:

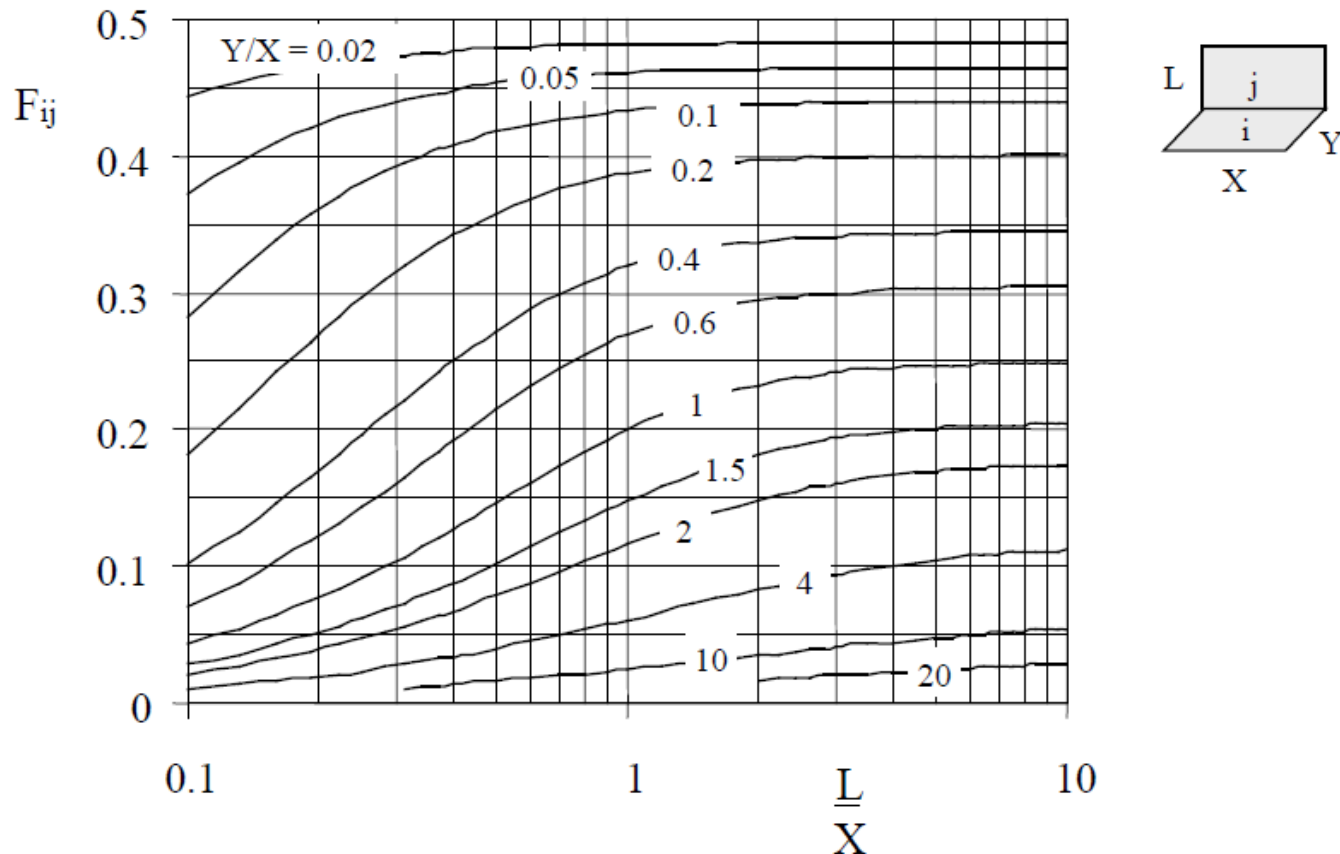
Per il principio di conservazione dell'energia, poiché tutta la radiazione emessa dalla superficie  $i$  di una cavità deve essere intercettata dalle superfici  $j$  della cavità stessa, si ha che:

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

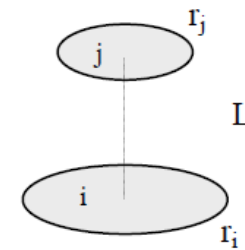
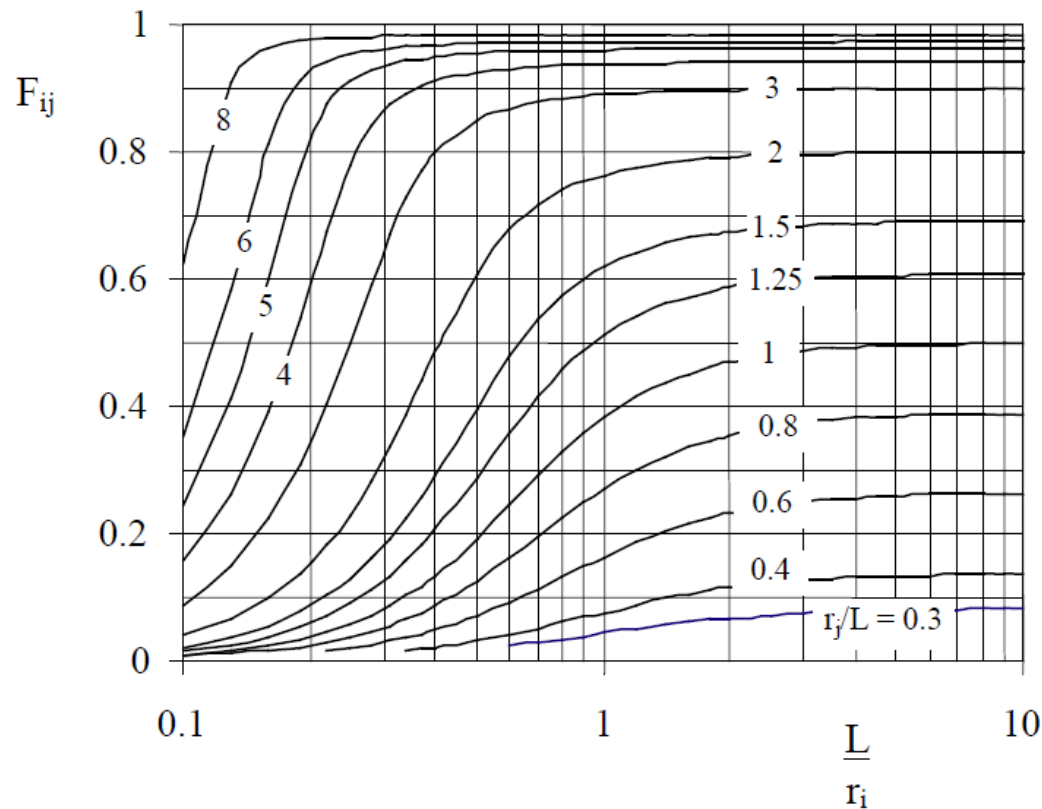
**IL FATTORE DI VISTA: SUPERFICI PIANE PARALLELE**



## IL FATTORE DI VISTA: SUPERFICI PIANE PERPENDICOLARI



## IL FATTORE DI VISTA: SUPERFICI CIRCOLARI PARALLELE E CONCENTRICI



## SCAMBIO TERMICO TRA SUPERFICI

### IPOTESI ADOTTATE:

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

### CONVENZIONI ADOTTATE:

$J_1$	potenza termica areica emessa dalla superficie 1 (anche detta radiosità)
$J_{1 \rightarrow 2}$	potenza termica areica emessa dalla superficie 1 che incide sulla superficie 2
$\dot{Q}_{1,2}$	potenza termica netta scambiata tra la superficie 1 e la superficie 2

$$\left. \begin{array}{l} J_1 \\ J_{1 \rightarrow 2} \\ \dot{Q}_{1,2} \end{array} \right\} \begin{array}{l} J_{1 \rightarrow 2} = F_{1 \rightarrow 2} J_1 \\ \dot{Q}_{1,2} = \dot{Q}_{1 \rightarrow 2} - \dot{Q}_{2 \rightarrow 1} = -\dot{Q}_{2,1} \\ \dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = A_1 J_{1 \rightarrow 2} = A_1 F_{1 \rightarrow 2} J_1 \end{array}$$

## SCAMBIO TERMICO TRA SUPERFICI

**CASO A: superfici nere**



$$J_1 = E_1^n = \sigma_0 T_1^4 \qquad J_2 = E_2^n = \sigma_0 T_2^4$$

La radiazione incidente viene assorbita completamente, quindi la radiosità è composta soltanto dall'emissione del corpo nero

$$\dot{Q}_{1,2} = \dot{Q}_{1 \rightarrow 2} - \dot{Q}_{2 \rightarrow 1} = A_1 F_{1 \rightarrow 2} E_1^n - A_2 F_{2 \rightarrow 1} E_2^n$$

$$A_1 F_{1 \rightarrow 2} = A_2 F_{2 \rightarrow 1}$$

$$\dot{Q}_{1,2} = A_1 F_{1 \rightarrow 2} (E_1^n - E_2^n)$$

$$\dot{Q}_{1,2} = A_1 F_{1 \rightarrow 2} \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4)$$

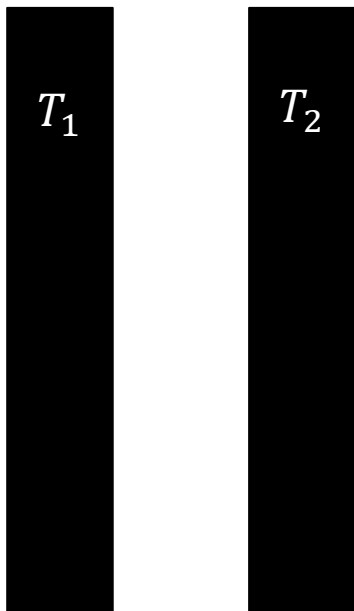
$$\dot{Q}_{1,2} = \frac{E_1^n - E_2^n}{\frac{1}{A_1 F_{1 \rightarrow 2}}}$$

$$\frac{1}{A_1 F_{1 \rightarrow 2}}$$

resistenza **spaziale**  
alla radiazione

**SCAMBIO TERMICO TRA SUPERFICI**

**Esempio: superfici piane parallele indefinite nere**



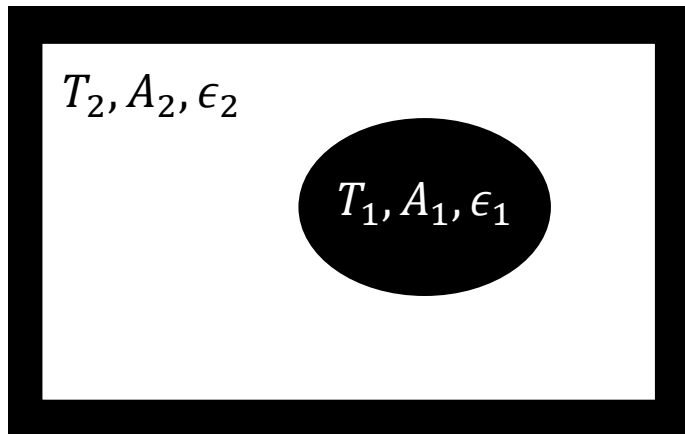
$$F_{1 \rightarrow 2} = 1$$

$$\dot{Q}_{1,2} = A_1 \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4)$$

potenza termica netta scambiata tra la  
superficie 1 e la superficie 2

## SCAMBIO TERMICO TRA SUPERFICI

Esempio: corpo nero in una cavità con superfici nere



$$\dot{Q}_{1,2} = A_1 \sigma_0 (T_1^4 - T_2^4)$$

potenza termica netta scambiata tra la superficie 1 e la superficie 2

$$F_{1 \rightarrow 2} = 1$$

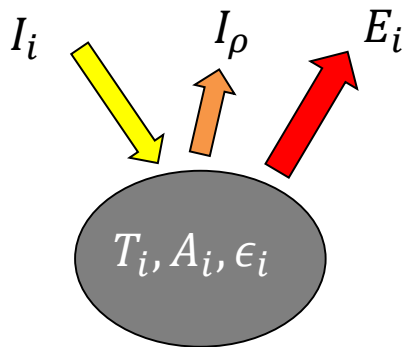
*l'energia emessa dal corpo interno, privo di concavità, cade per intero sulle superfici della cavità*

$$F_{2 \rightarrow 1} \neq 1$$

*l'energia emessa dalle pareti della cavità in parte incide sul corpo interno e in parte sulla cavità stessa perché concava*

*Rif. dispensa sezione 11.1 e figura 11.6 per maggiori informazioni*

## BILANCIO TERMICO DI SUPERFICIE GRIGIA OPACA



radiosità  $\rightarrow J_i$       radiazione emessa  $\rightarrow E_i$       radiazione riflessa  $\rightarrow \rho_i I_i$

$$J_i = E_i + \rho_i I_i$$

$$J_i = \alpha_i E_i^n + (1 - \alpha_i) I_i$$

$\epsilon = \alpha$   
 $\alpha + \rho = 1$

## POTENZA TERMICA NETTA USCENTE DALLA SUPERFICIE $i$ :

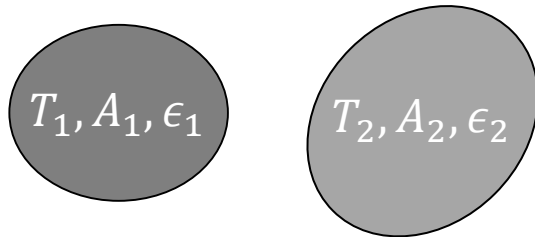
$$\dot{Q}_i = A_i (J_i - I_i)$$

radiazione che abbandona  $i$   $\rightarrow J_i$

radiazione incidente su  $i$   $\rightarrow I_i$

## SCAMBIO TERMICO TRA SUPERFICI

**CASO B: superfici grigie**



$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_{1,2} = A_1 (J_1 - I_1) \quad I_1 = \frac{J_1 - \alpha_1 E_1^n}{1 - \alpha_1}$$

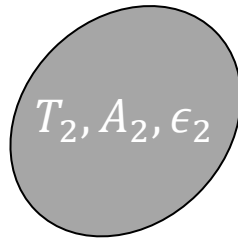
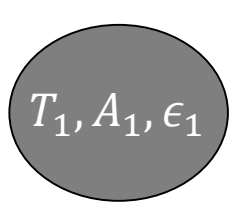
$$\dot{Q}_{1,2} = A_1 \left( J_1 - \frac{J_1 - \alpha_1 E_1^n}{1 - \alpha_1} \right) \quad \text{irradiazione}$$

$$\dot{Q}_{1,2} = \frac{E_1^n - J_1}{\frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1 A_1}}$$

resistenza **superficiale**  
all'irraggiamento

$$\dot{Q}_{2,1} = \frac{E_2^n - J_2}{\frac{1 - \alpha_2}{\alpha_2 A_2}}$$



**SCAMBIO TERMICO TRA SUPERFICI****CASO B: superfici grigie**

$$\dot{Q}_{1,2} = \frac{E_1^n - J_1}{\frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1 A_1}}$$

$$\dot{Q}_{1,2} = -\dot{Q}_{2,1} = \frac{J_2 - E_2^n}{\frac{1 - \alpha_2}{\alpha_2 A_2}}$$

$$\dot{Q}_{1,2} = \dot{Q}_{1 \rightarrow 2} - \dot{Q}_{2 \rightarrow 1} = A_1 F_{1 \rightarrow 2} J_1 - A_2 F_{2 \rightarrow 1} J_2$$

$$A_1 F_{1 \rightarrow 2} = A_2 F_{2 \rightarrow 1}$$

$$\dot{Q}_{1,2} = A_1 F_{1 \rightarrow 2} (J_1 - J_2)$$

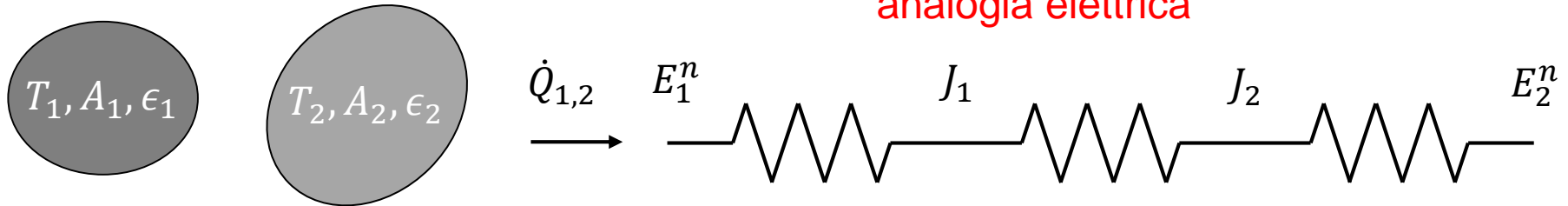
$$\dot{Q}_{1,2} = \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 F_{1 \rightarrow 2}}}$$

analogia elettrica



## SCAMBIO TERMICO TRA SUPERFICI

### CASO B: superfici grigie

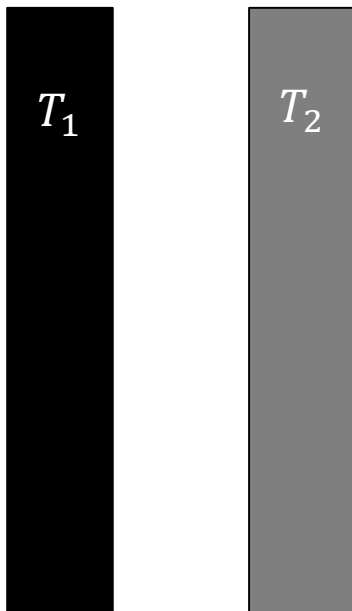


$$\dot{Q}_{1,2} = \frac{E_1^n - E_2^n}{\frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{1 \rightarrow 2}} + \frac{1 - \alpha_2}{\alpha_2 A_2}}$$

Nota: non è utilizzabile assieme a resistenze di tipo conduttive e convettive perché  $E^n = f(T^4)$

**SCAMBIO TERMICO TRA SUPERFICI**

**Esempio: superfici piane parallele indefinite nera-grigia**



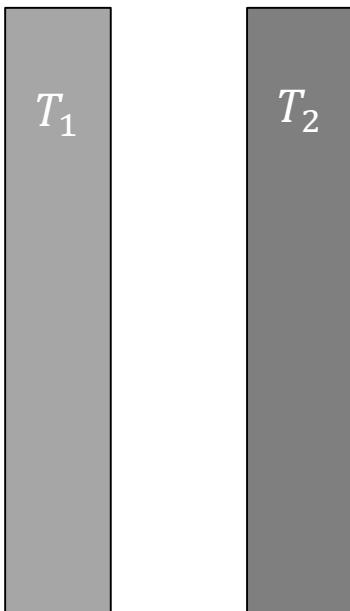
$$\dot{Q}_{1,2} = \frac{E_1^n - E_2^n}{0 + \frac{1}{A} + \frac{1 - \alpha_2}{\alpha_2 A}}$$

$$\dot{Q}_{1,2} = A\alpha_2\sigma_0(T_1^4 - T_2^4)$$

potenza termica netta scambiata tra la  
superficie 1 e la superficie 2

**SCAMBIO TERMICO TRA SUPERFICI**

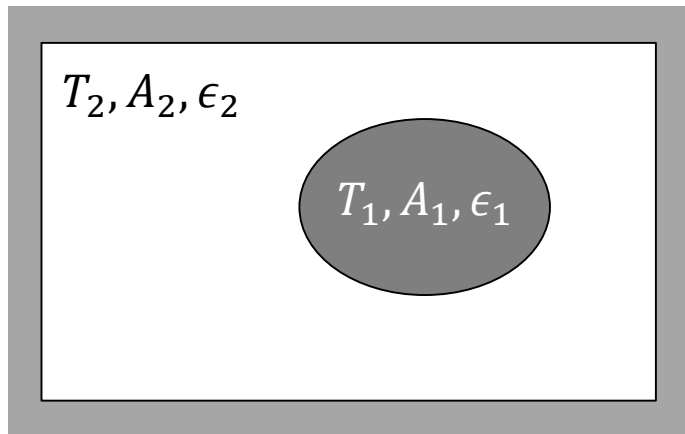
**Esempio: superfici piane parallele indefinite grigia-grigia**



$$\dot{Q}_{1,2} = \frac{E_1^n - E_2^n}{\frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1 A} + \frac{1}{A} + \frac{1 - \alpha_2}{\alpha_2 A}}$$

$$\dot{Q}_{1,2} = \frac{A\sigma_0(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} - 1}$$

potenza termica netta scambiata tra la  
superficie 1 e la superficie 2

**SCAMBIO TERMICO TRA SUPERFICI****Esempio: corpo grigio in una cavità con superfici grigie**

$$F_{1 \rightarrow 2} = 1$$

$$F_{2 \rightarrow 1} \neq 1$$

$$\dot{Q}_{1,2} = \frac{E_1^n - E_2^n}{\frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{1 \rightarrow 2}} + \frac{1 - \alpha_2}{\alpha_2 A_2}}$$

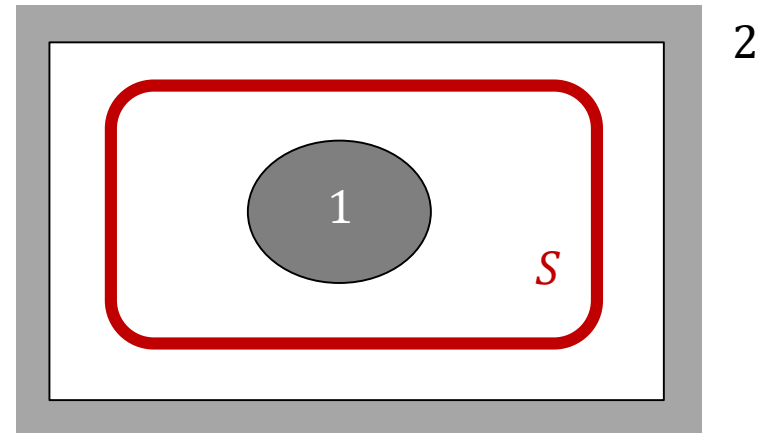
$$\dot{Q}_{1,2} = \frac{\sigma_0 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1 A_1} + \frac{1}{A_1} + \frac{1 - \alpha_2}{\alpha_2 A_2}}$$

potenza termica netta scambiata tra la  
superficie 1 e la superficie 2

**SCAMBIO TERMICO TRA SUPERFICI****Esempio: schermo radiante**

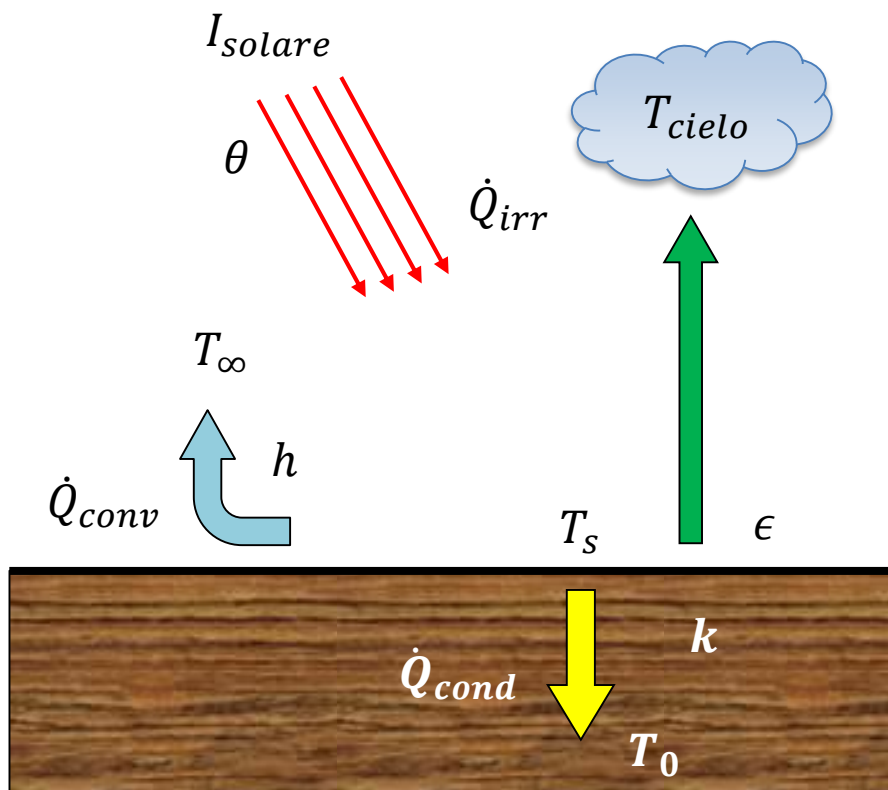
$$F_{1 \rightarrow S} = 1 \quad F_{S \rightarrow 2} = 1$$

$$F_{S \rightarrow 1} \neq 1 \quad F_{2 \rightarrow S} \neq 1$$



$$\dot{Q}_{1,2} = \frac{\sigma_0(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \alpha_1}{\alpha_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{1 \rightarrow S}} + \frac{1 - \alpha_{S1}}{\alpha_{S1} A_{S1}} + \frac{1 - \alpha_{S2}}{\alpha_{S2} A_{S2}} + \frac{1}{A_{S2} F_{S \rightarrow 2}} + \frac{1 - \alpha_2}{\alpha_2 A_2}}$$

## SCAMBIO TERMICO SULLA SUPERFICIE TERRESTRE



$S$ : superficie di scambio

$k$ : conduttività termica del suolo

$h$ : coefficiente di scambio convettivo

$\epsilon$ : emissività superficie

$\theta$ : angolo tra la direzione di incidenza dei raggi solari e la normale alla superficie (zenith)

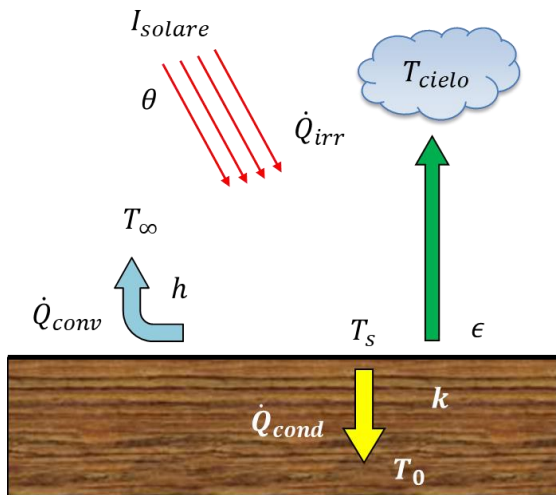
$T_0$ : temperatura del suolo a profondità  $L$

$T_s$ : temperatura della superficie

$T_{\infty}$ : temperatura dell'aria

$T_{cielo}$ : temperatura del cielo

## SCAMBIO TERMICO SULLA SUPERFICIE TERRESTRE



La temperatura equivalente del cielo dipende dalle condizioni atmosferiche e varia nell'intervallo 230-285 K. I valori inferiori si hanno con condizioni di cielo sereno e con poca umidità mentre i valori maggiori si hanno con cielo coperto e con elevato tasso di umidità.

### Bilancio energetico

$$\alpha_s S I_{solare} \cos \theta + \frac{kS}{L} (T_0 - T_s) - hS (T_s - T_\infty) - \epsilon \sigma_0 S (T_s^4 - T_{cielo}^4) = 0$$