

Fisica Tecnica (Modulo 1)- LM4

Fisica Tecnica – L23

A.A. 2021-2022





Lezione n. 17

Irraggiamento termico

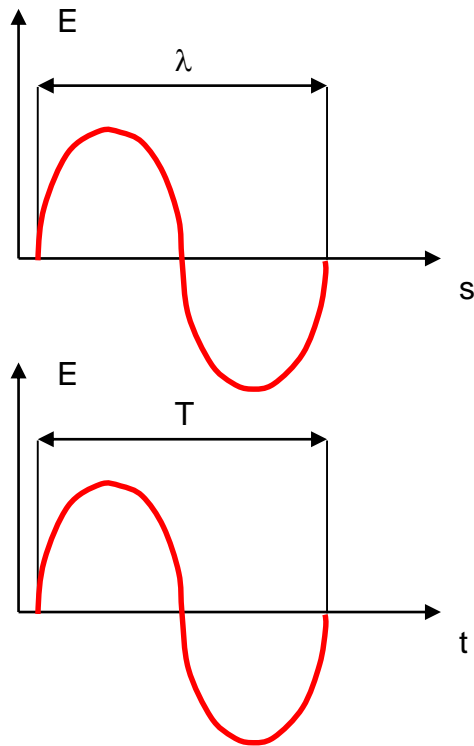


Meccanismo di **scambio termico** che avviene attraverso **radiazioni elettromagnetiche** tra **due corpi a diversa temperatura non a contatto** tra di loro.

Onde elettromagnetiche: perturbazioni periodiche del campo elettromagnetico

Si propagano nello spazio anche in assenza di un mezzo (es. aria) → l'irraggiamento avviene **anche nel vuoto**. **Aria trasparente alle radiazioni elettromagnetiche** (sia l'ossigeno che l'azoto non interagiscono con esse).

E (s, t): generico **campo elettromagnetico** (definito nello spazio s e nel tempo t)



Lunghezza d'onda λ (m): distanza tra due punti, distanziati da un ciclo completo, in cui il campo $E(s,t)$ assume lo stesso valore (es. due massimi, due minimi, due punti omologhi).

Periodo T (s): tempo che intercorre tra due istanti, distanziati da un ciclo completo, in cui il campo $E(s,t)$ assume lo stesso valore.

Frequenza $f = \frac{1}{T}$ ($s^{-1} = Hz$)

Velocità c (m/s) → $c = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$

Nel vuoto: $c = 3 \times 10^8$ m/s

Radiazioni termiche: emesse dai corpi solo per il loro **stato termico superficiale**.

Tutti i corpi a temperatura superficiale superiore a 0 K emettono radiazioni.

Onde visibili (luce) ed infrarossi (IR) sono le principali responsabili del trasporto di calore.

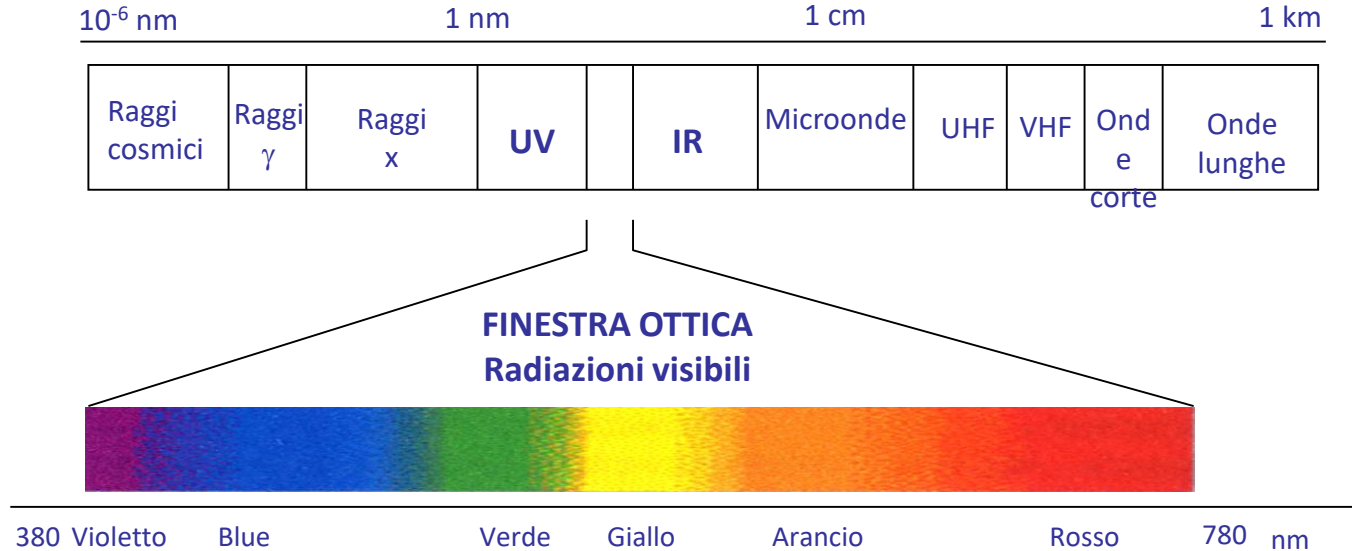
Campo del visibile: $\lambda = 380 \div 780 \text{ nm}$ ($0,38 \div 0,78 \mu\text{m}$)

Radiazioni ultraviolette (UV): $\lambda < 380 \text{ nm}$ ($< 0,38 \mu\text{m}$)

Radiazioni infrarosse (IR): $\lambda > 780 \text{ nm}$ ($> 0,78 \mu\text{m}$)

I corpi esistenti in natura emettono radiazioni IR.

Se si raggiungono **temperature elevate** (800-1000 K) \rightarrow fenomeno dell'**incandescenza**:
emissione di **radiazioni luminose**.



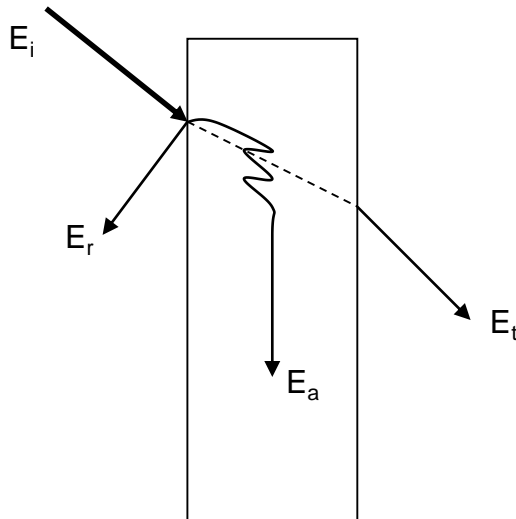
Radiazione incidente su parete con energia E_i :

E_i si ripartisce in una **quota-parte riflessa** E_r , una **trasmessa** E_t ed una **assorbita** E_a .

Principio di **conservazione dell'energia**

$$E_i = E_r + E_t + E_a$$

$$\frac{E_i}{E_i} = \frac{E_r}{E_i} + \frac{E_t}{E_i} + \frac{E_a}{E_i} \Rightarrow r + t + a = 1$$



Coefficiente di **riflessione**: $r = \frac{E_r}{E_i}$

Coefficiente di **trasmissione**: $t = \frac{E_t}{E_i}$

Coefficiente di **assorbimento**: $a = \frac{E_a}{E_i}$

Leggi di emissione del corpo nero

Corpo nero: modello **ideale** di comportamento (emissione, assorbimento di radiazioni)

Assorbitore ideale/perfetto:

Assorbe **tutte le radiazioni incidenti** sulla sua superficie (**$a = 1$**)

Può essere assorbitore ideale di **tutte le radiazioni elettromagnetiche** o **solo** di quelle appartenenti ad un **particolare settore** dello spettro elettromagnetico.

Es. manto di neve assorbitore quasi perfetto rispetto agli IR.

Emettitore ideale/perfetto:

Emette la **massima potenza termica raggiante** ad una certa **temperatura** (limite alla emissione dei corpi reali)

Un **corpo reale** a temperatura superficiale **T non potrà mai emettere una potenza termica superiore** a quella di un **corpo nero** alla **stessa temperatura** e di **uguale superficie**.

Leggi di emissione del corpo nero - Legge di Planck

$$E_{n,\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot (e^{C_2/\lambda \cdot T} - 1)}$$

$E_{n,\lambda}$: potere emissivo monocromatico del corpo nero ($\text{W}/\text{m}^2 \mu\text{m}$);

λ : lunghezza d'onda (m);

T: temperatura (K);

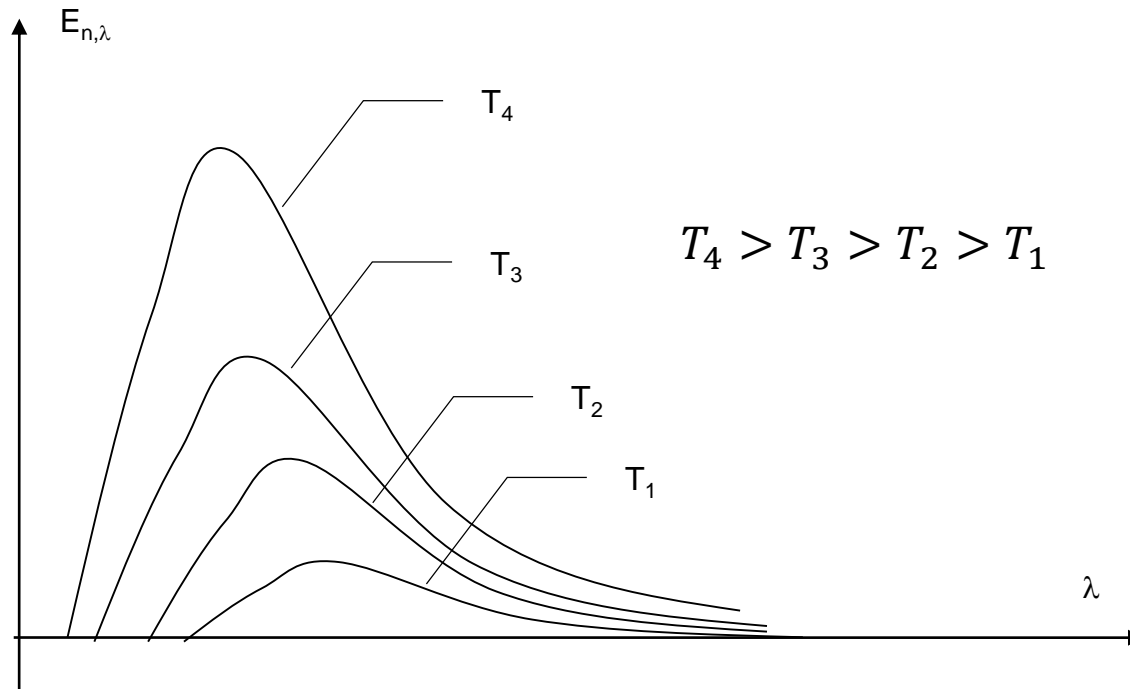
C_1 : $3,74 \cdot 10^8 \text{ W } \mu\text{m}^4/\text{m}^2$

C_2 : $1,44 \cdot 10^4 \mu\text{m K}$

Potere emissivo monocromatico: flusso termico emesso da un corpo nero per **unità di lunghezza d'onda** → fornisce la **distribuzione spettrale** del flusso termico.

Rappresentazione grafica della legge di Planck

Potere emissivo monocromatico in **funzione della lunghezza d'onda** con **parametro la temperatura**



All'aumentare della temperatura, il **punto di massimo** di ciascuna curva assume **valori crescenti** del potere emissivo monocromatico, ma **per lunghezze d'onda decrescenti**.

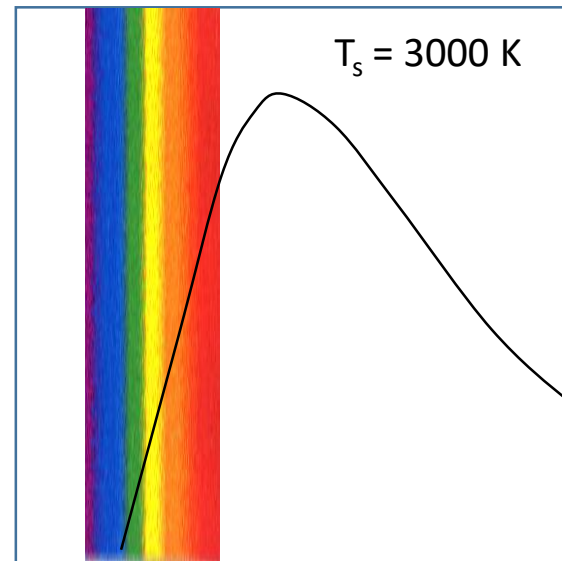
Leggi di emissione del corpo nero - Legge di Wien

Relazione esistente tra **temperatura** e **lunghezza d'onda di massima emissione**, ricavabile effettuando un'operazione di derivazione della **funzione di Planck**.

Temperatura superficiale e **lunghezza d'onda di massima emissione** del corpo nero sono **inversamente proporzionali** \rightarrow (prodotto pari ad una costante):

$$\lambda_{max} \cdot T = 2898 \quad \mu m \cdot K$$

Fenomeno dell'incandescenza in una lampada: **filamento di tungsteno** attraversato da **corrente elettrica** si riscalda per **effetto Joule** ($T_s \cong 3000 K$) \rightarrow **ramo di sinistra** della curva di emissione **nel campo del visibile**.

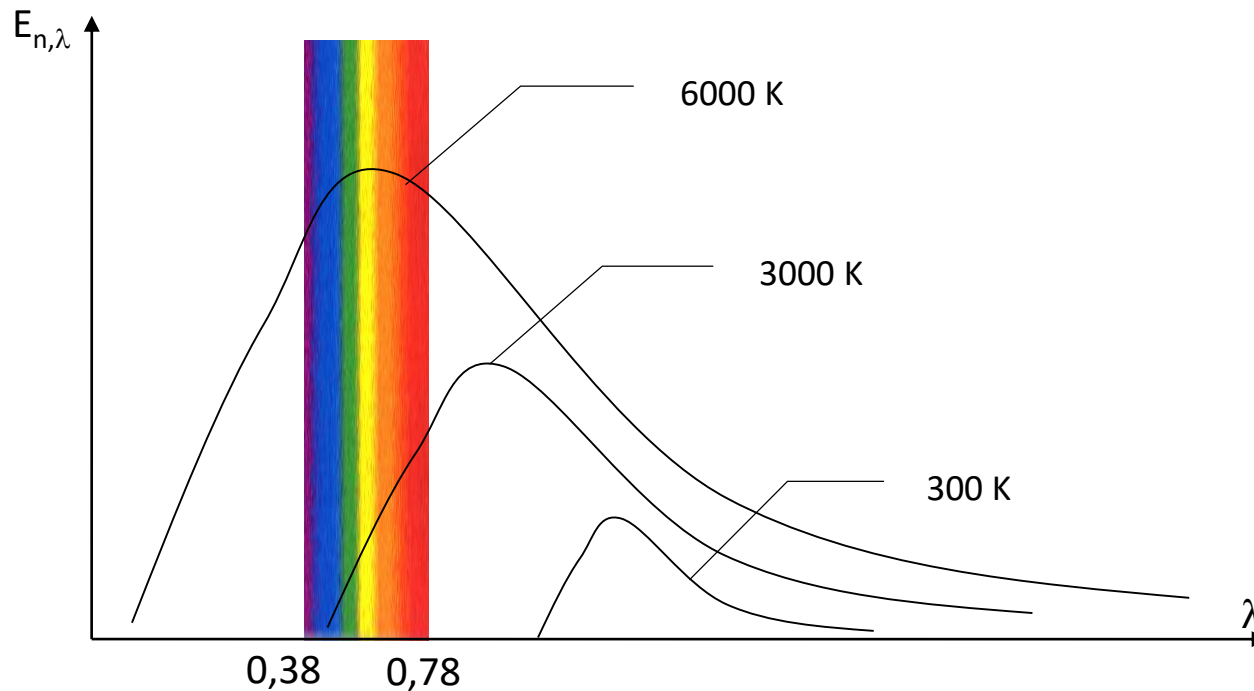


Emissione del sole - Temperatura superficiale $\sim 6000\text{ K}$

$$\lambda_{max} \cdot T = 2898 \Rightarrow \lambda_{max} \cdot 6000 = 2898 \Rightarrow \lambda_{max} = 0,483\ \mu\text{m} \quad (\text{al centro del visibile})$$

Emissione di un corpo - Temperatura superficiale $\sim 300\text{ K}$

$$\lambda_{max} \cdot T = 2898 \Rightarrow \lambda_{max} \cdot 300 = 2898 \Rightarrow \lambda_{max} = 9,66\ \mu\text{m} \quad (\text{in pieno IR})$$



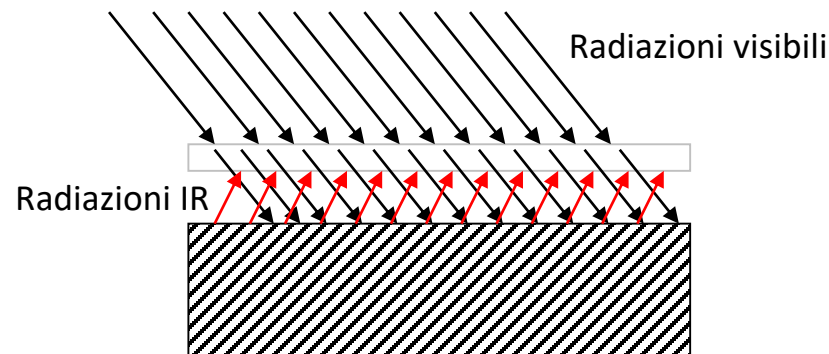
Effetto serra

Corpo opaco dietro una **superficie trasparente al visibile** (vetro, policarbonato...) sottoposta a **radiazioni solari**.

Energia luminosa incidente sulla superficie trasparente → **in massima parte la attraversa**, in **piccole percentuali** viene **riflessa o assorbita** → **incide sulla superficie opaca** che in **grossa percentuale la assorbe** → **riscaldamento del corpo** → **aumenta l'emissione di radiazioni infrarosse**.

Gli **IR emessi** dal corpo **incidono sulla superficie trasparente** → vengono **riflessi o assorbiti** (trasparenza del vetro relativa solo al visibile) → **riscaldamento del vetro** (assorbimento).

Gli **IR riflessi** **incidono di nuovo sulla superficie opaca** con conseguente **surriscaldamento del corpo** → l'aria compresa tra le due superfici a **contatto con corpi ad elevata temperatura** → **surriscaldamento**.



Leggi di emissione del corpo nero - Legge di Stephan - Boltzman

Operando una **integrazione della funzione di Planck** al variare di λ in tutto il campo di emissione si può calcolare il **potere emissivo totale** di un **corpo nero** a **temperatura T**:

$$\phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E_{n,\lambda} \cdot d\lambda = \sigma \cdot T^4 \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Φ : flusso termico globale emesso dal corpo nero (W/m²)

σ : costante di Stephan-Boltzman = 5,67x10⁻⁸ (W/m² K⁴)

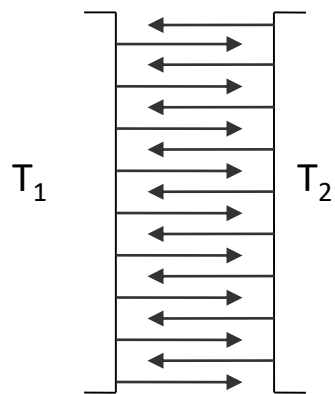
T: temperatura superficiale del corpo nero (K)

Noto il flusso termico si può calcolare la **potenza globalmente emessa dal corpo nero** moltiplicando il flusso per l'area **A della superficie del corpo**.

$$\dot{Q} = \phi \cdot A = \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad [W]$$

Scambi termici radiativi tra due corpi neri a diversa temperatura

Hp: due corpi neri di uguali superfici a temperature superficiali T_1 e T_2 (con $T_1 > T_2$) tra loro perfettamente affacciati \rightarrow tutta l'energia radiante uscente da uno dei due incide sull'altro e viceversa.



$$A_1 = A_2 = A$$

Potenza termica globalmente emessa dal corpo 1: $\dot{Q}_1 = \sigma \cdot A \cdot T_1^4$

Potenza termica globalmente emessa dal corpo 2: $\dot{Q}_2 = \sigma \cdot A \cdot T_2^4$

Bilancio termico sul corpo 1

(differenza tra la potenza termica assorbita da 1 e quella emessa da 1 e assorbita da 2)

$$\dot{Q}_{12} = \sigma \cdot A \cdot T_2^4 - \sigma \cdot A \cdot T_1^4 = \sigma \cdot A \cdot (T_2^4 - T_1^4)$$

Bilancio termico sul corpo 2

(differenza tra la potenza termica assorbita da 2 e quella emessa da 2 e assorbita da 1)

$$\dot{Q}_{21} = \sigma \cdot A \cdot T_1^4 - \sigma \cdot A \cdot T_2^4 = \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Fattore di intercettazione o di forma

Corpi non perfettamente affacciati → non tutta l'energia emessa da uno incide sull'altro.

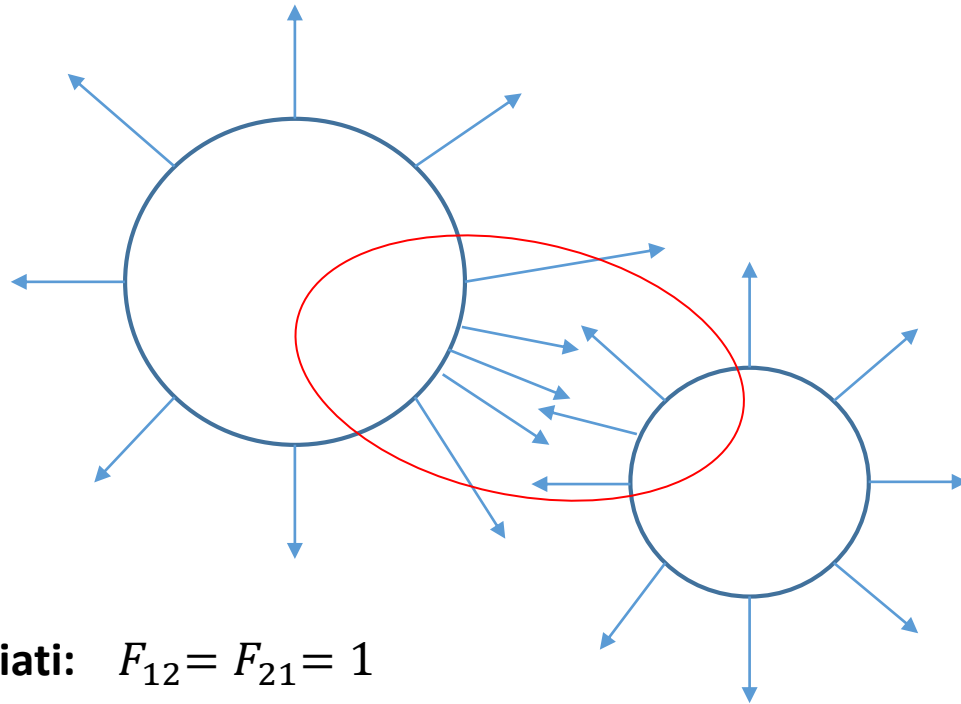
Dipende dalla **configurazione geometrica** del sistema.

Fattore di intercettazione F_{12} : rapporto tra la **potenza termica emessa dal corpo 1** che **incide sul corpo 2** e **quella totalmente emessa** dallo stesso corpo 1

Fattore di intercettazione F_{21} : rapporto tra la **potenza termica emessa dal corpo 2** che **incide sul corpo 1** e **quella totalmente emessa** dal corpo 2.

$$F_{12} < 1$$

$$F_{21} < 1$$

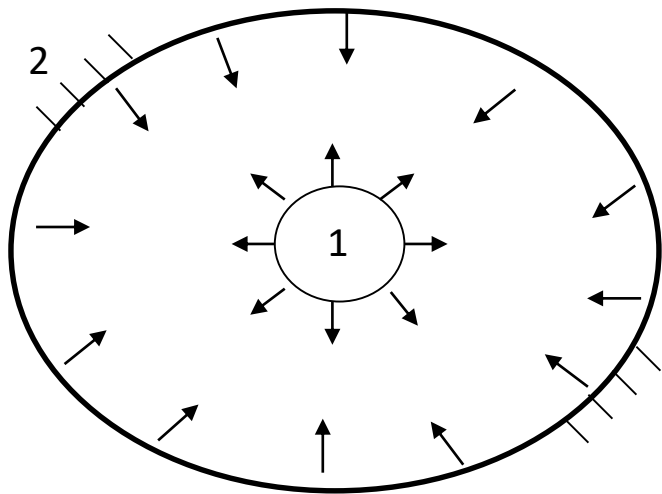


Corpi perfettamente interfacciati: $F_{12} = F_{21} = 1$

Relazione di reciprocità

$$A_1 \cdot F_{12} = A_2 \cdot F_{21}$$

Caso particolare: scambio termico tra un **corpo convesso (1)** ed una **cavità (2)** in cui è immerso.



L'energia **emessa dal corpo 1** **incide** totalmente **sul corpo 2**, mentre l'energia **emessa dal corpo 2** finisce **solo in parte sul corpo 1** e la restante parte ricade sul corpo 2 stesso.

$$F_{12} = 1$$

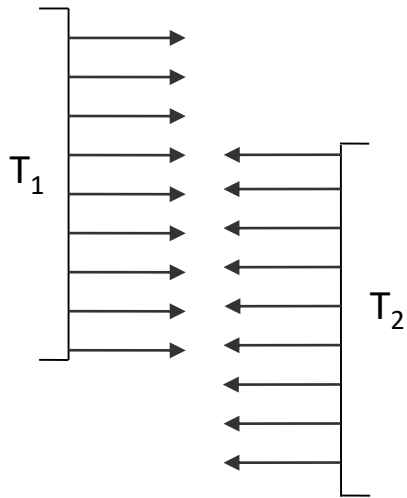
Per la **relazione di reciprocità:**

$$F_{21} = \frac{A_1}{A_2}$$

$$A_1 < A_2 \Rightarrow F_{21} < 1$$

Scambi termici radiativi tra due corpi neri non perfettamente affacciati.

Hp: due corpi neri a temperature T_1 e T_2 , diverse tra di loro non perfettamente affacciati.



Potenza termica globalmente **emessa dal corpo 1**: $\dot{Q}_1 = \sigma \cdot A_1 \cdot T_1^4$

Potenza termica globalmente **emessa dal corpo 2**: $\dot{Q}_2 = \sigma \cdot A_2 \cdot T_2^4$

Tutta la potenza emessa dal corpo 1 incidente su 2 viene assorbita e viceversa (entrambi neri).

Potenza termica **emessa dal corpo 1 che incide su 2** $\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = F_{12} \cdot \sigma \cdot A_1 \cdot T_1^4$

Potenza termica **emessa dal corpo 2 che incide su 1** $\dot{Q}_{2 \rightarrow 1} = F_{21} \cdot \sigma \cdot A_2 \cdot T_2^4$

Bilancio termico sul **corpo 1**: $\dot{Q}_{12} = F_{21} \cdot \sigma \cdot A_2 \cdot T_2^4 - F_{12} \cdot \sigma \cdot A_1 \cdot T_1^4$

$$A_1 \cdot F_{12} = A_2 \cdot F_{21} \Rightarrow \dot{Q}_{12} = \sigma \cdot A_1 \cdot F_{12} \cdot (T_2^4 - T_1^4)$$

Bilancio termico sul **corpo 2**: $\dot{Q}_{21} = F_{12} \cdot \sigma \cdot A_1 \cdot T_1^4 - F_{21} \cdot \sigma \cdot A_2 \cdot T_2^4$

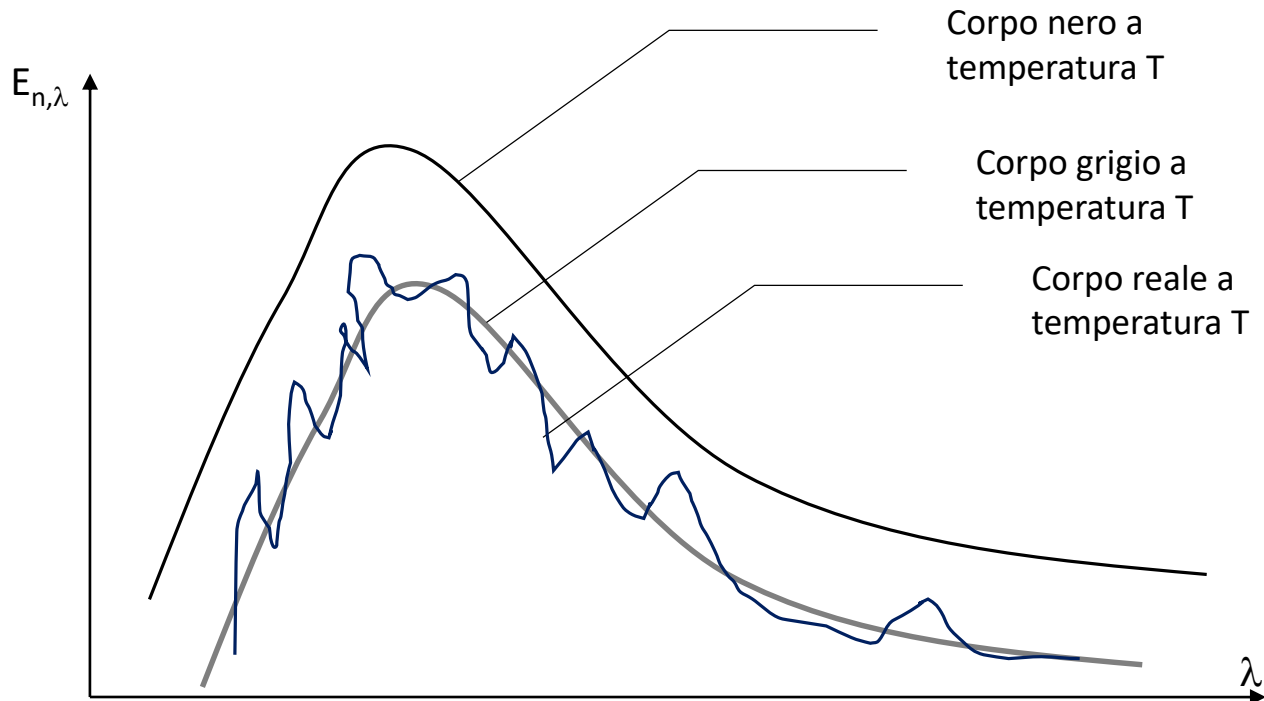
$$A_1 \cdot F_{12} = A_2 \cdot F_{21} \Rightarrow \dot{Q}_{12} = \sigma \cdot A_1 \cdot F_{12} \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Emissione dei corpi grigi

Corpi reali caratterizzati da **spettri di emissione irregolari**.

Si può ricondurre il comportamento dei corpi reali al **modello di *corpo grigio***

Emissione di un corpo grigio: emissione radiativa **simile a quella del corpo nero** alla **stessa temperatura** ma con valori ridotti



Coefficiente di emissione o emissività ϵ .

Emissività **monocromatica** ϵ_λ :
$$\epsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{n,\lambda}}$$

Potere emissivo **monocromatico** di un **corpo reale** **fratto** il potere emissivo **monocromatico** di un **corpo nero** **alla stessa temperatura**

Legge di **Kirchoff**:
$$\epsilon_\lambda = a_\lambda$$

Potere emissivo monocromatico e **assorbimento** monocromatico **si equivalgono** per ogni valore di lunghezza d'onda

- **Corpi reali**: **emissività** dipendente dalla **lunghezza d'onda**
- **Corpi grigi**: emissività **costante** in tutto lo spettro di lunghezze d'onda

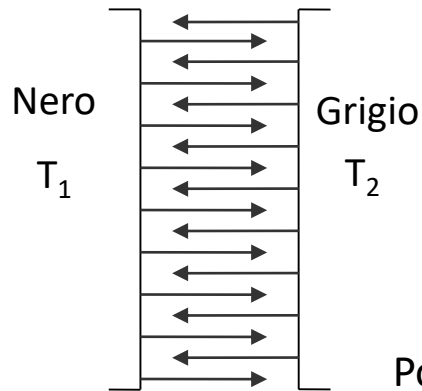
Emissività **di un corpo grigio**:
$$\epsilon = \frac{E_g}{E_n}$$

Potere emissivo **globale** di un **corpo grigio** **fratto** potere emissivo **globale** di un **corpo nero** **alla stessa temperatura**

Legge di **Kirchoff per un corpo grigio**:
$$\epsilon = a$$

Scambi termici radiativi tra corpi neri e grigi a diversa temperatura

Hp: **Corpo nero** a temperatura superficiale T_1 e **corpo grigio** a temperatura superficiale T_2 (con $T_1 > T_2$) tra loro **perfettamente affacciati**.



$$A_1 = A_2 = A$$

Potenza termica globalmente emessa dal corpo 1: $\dot{Q}_1 = \sigma \cdot A \cdot T_1^4$

Potenza termica globalmente emessa dal corpo 2: $\dot{Q}_2 = \sigma \cdot \varepsilon_2 \cdot A \cdot T_2^4$

Potenza termica emessa dal corpo 1 e assorbita da 2 $\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = a_2 \cdot \sigma \cdot A \cdot T_1^4$

Potenza termica emessa dal corpo 2 assorbita da 1 $\dot{Q}_{2 \rightarrow 1} = \varepsilon_2 \cdot \sigma \cdot A \cdot T_2^4$

Bilancio termico sul corpo 1

(potenza termica assorbita da 1 meno quella emessa da 1 e assorbita da 2)

$$\dot{Q}_{12} = \sigma \cdot \varepsilon_2 \cdot A \cdot T_2^4 - \sigma \cdot a_2 \cdot A \cdot T_1^4 = \sigma \cdot A \cdot \varepsilon_2 \cdot (T_2^4 - T_1^4)$$

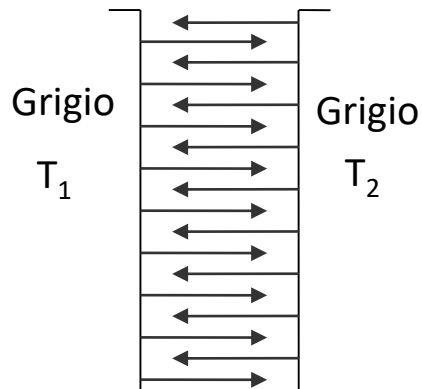
Bilancio termico sul corpo 2

(potenza termica assorbita da 2 meno quella emessa da 2 e assorbita da 1)

$$\dot{Q}_{21} = \sigma \cdot a_2 \cdot A \cdot T_1^4 - \sigma \cdot \varepsilon_2 \cdot A \cdot T_2^4 = \sigma \cdot A \cdot \varepsilon_2 \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Scambi termici radiativi tra corpi grigi a diversa temperatura

Hp: due corpi grigi di uguali superfici a temperature superficiali T_1 e T_2 (con $T_1 > T_2$) tra loro perfettamente affacciati



$$A_1 = A_2 = A$$

Potenza termica globalmente emessa dal corpo 1: $\dot{Q}_1 = \sigma \cdot \varepsilon_1 \cdot A \cdot T_1^4$

Potenza termica globalmente emessa dal corpo 2: $\dot{Q}_2 = \sigma \cdot \varepsilon_2 \cdot A \cdot T_2^4$

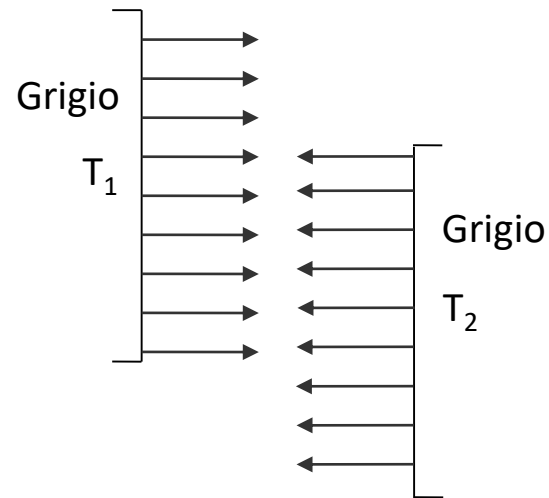
Non tutta l'energia emessa dal corpo 1 assorbita dal corpo 2, parte; riflessa, torna sul corpo 1 che di nuovo in parte la riflette rinvilandola verso 2 e così via. Analogamente accade all'energia emessa dal corpo 2. Soluzione analitica: **Somma di una serie convergente**

Bilancio termico sul corpo 1:
$$\dot{Q}_{12} = \frac{\sigma \cdot A \cdot (T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

Bilancio termico sul corpo 2:
$$\dot{Q}_{21} = \frac{\sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

Scambi termici radiativi tra corpi grigi a diversa temperatura

Hp: due corpi grigi a temperature superficiali T_1 e T_2 (con $T_1 > T_2$) tra loro non perfettamente affacciati



$$\dot{Q}_{12} = F(A_1, A_2, F_{12}, \varepsilon_1, \varepsilon_2) \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_1^4)$$

$$\dot{Q}_{21} = F(A_1, A_2, F_{12}, \varepsilon_1, \varepsilon_2) \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$