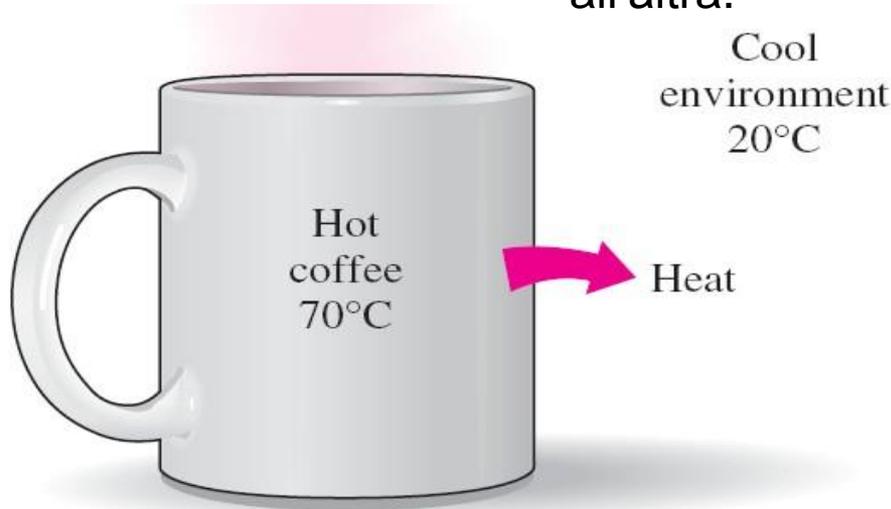


Trasmissione del calore:

- Conduzione
- **Convezione**
- Irraggiamento

Cos'è la Convezione:

È lo scambio di calore che avviene tra una superficie e un fluido che si trovano a diversa temperatura e in movimento l'uno rispetto all'altra.

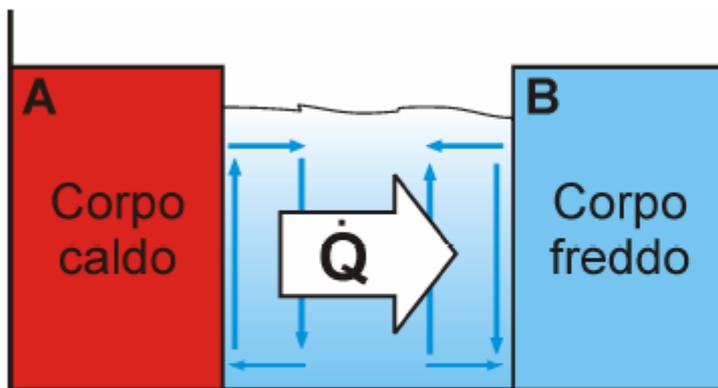


Il calore si disperde nel verso delle temperature decrescenti (dall' ambiente più caldo verso quello più freddo):

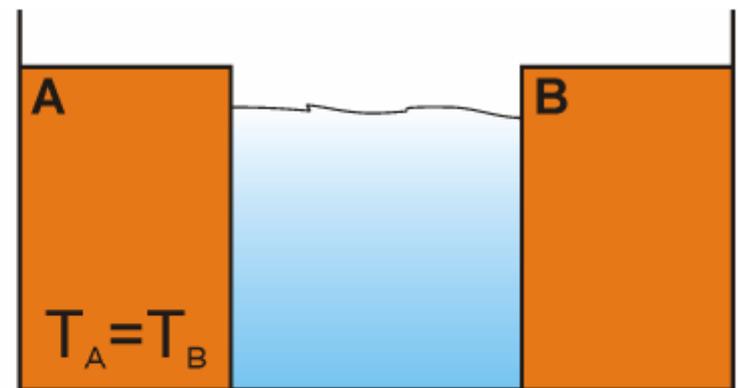
- attraverso il materiale solido (struttura molecolare fissa con particelle che vibrano attorno alla posizione di equilibrio) si propaga per conduzione termica
- dall'ambiente caldo verso la superficie solida per **convezione** e irraggiamento
- dalla superficie solida più fredda verso l'ambiente più freddo per **convezione** e irraggiamento

Convezione

- Scambio termico tra un solido ed un fluido in movimento che ne lambisce la superficie
- È quindi vincolato al trasporto di materia per effetto delle forze che agiscono sul fluido e che si generano a causa delle variazioni di temperatura.

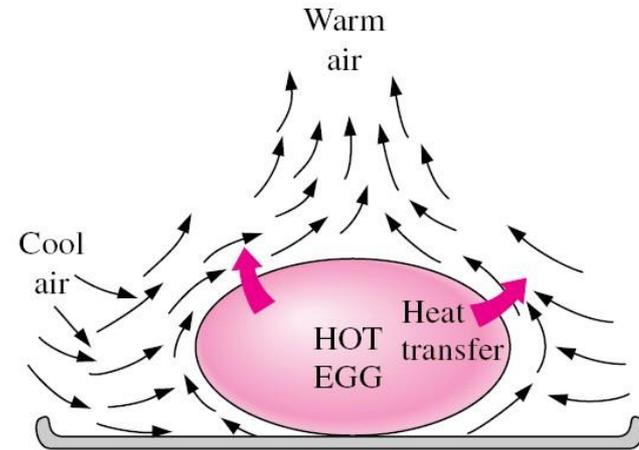
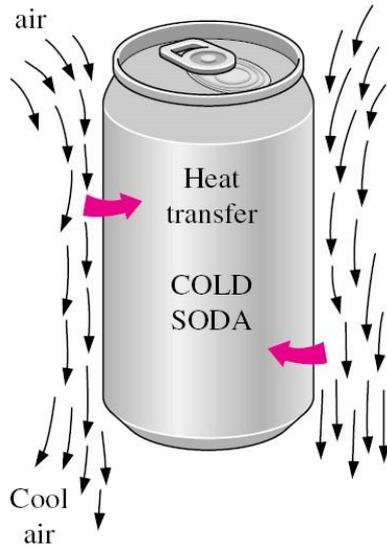


FASE 1



FASE 2

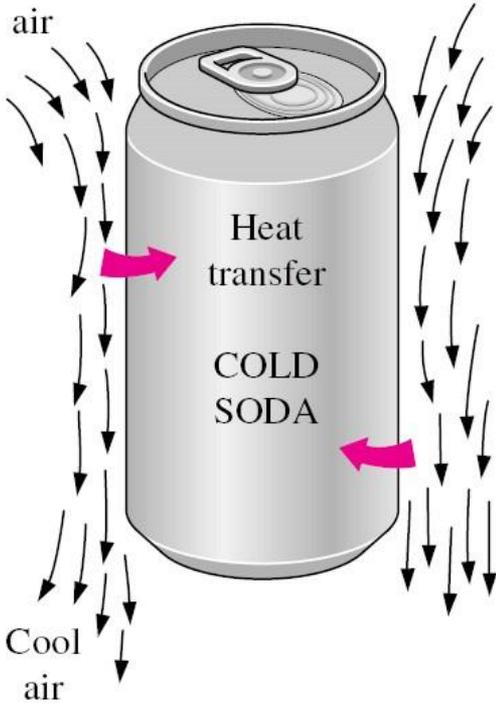
Convezione



- **Forze ascensionali** che sono responsabili del moto naturale dell'aria per effetto di una differenza di temperatura e pressione
- **Forze di viscosità** che oppongono al moto dell'aria.

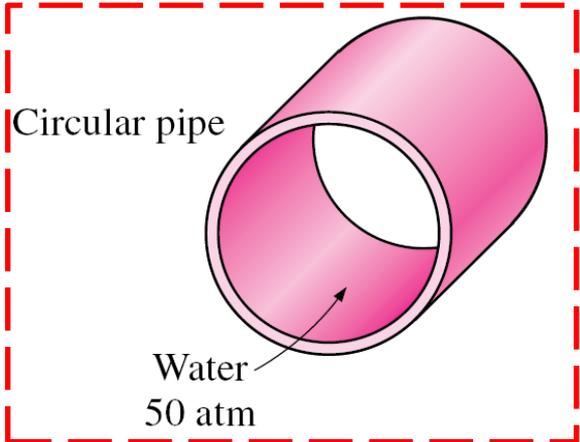
CONVEZIONE NATURALE

Moto dato dalle forze di galleggiamento (si tratta di forze ascensionali che derivano dalle differenze di densità tra le porzioni di fluido, causate dalle variazioni di temperatura nel fluido stesso.



CONVEZIONE FORZATA

Flusso causato da mezzi esterni (es: pompe, ventilatori, pale, ecc.)



Flusso di calore per convezione

Equazione del flusso termico specifico trasmesso per convezione trasmesso tra una superficie a temperatura T_s e un fluido a temperatura T_a :

$$\mathbf{q} = \mathbf{h}_c(\mathbf{T}_s - \mathbf{T}_a) \quad (\mathbf{W}/\mathbf{m}^2)$$

\mathbf{h}_c è detto coefficiente di scambio termico per convezione ($\mathbf{W}/\mathbf{m}^2\mathbf{K}$)

Esso dipende dalle condizioni nello strato limite:

- Geometria della parete
- Natura del moto del fluido
- Velocità, pressione e tante altre variabili che rendono la determinazione matematica di h estremamente difficile.

$$h_c = h_c[\rho, c_p, \mu, \lambda, l, u_f, \alpha \cdot g, (T_p - T_f)]$$

Il coefficiente di scambio termico convettivo (h_c) dipende:

1) dalle caratteristiche del fluido

-densità ρ

-viscosità dinamica η

-calore specifico C_p

-conduttività termica λ

2) dalle condizioni di moto del fluido

-velocità u

-accelerazione gravitazionale $\alpha \cdot g$

3) dalla geometria del sistema

- dimensione l

4) dalla differenza di temperatura fra fluido e sistema Δt

Alcuni valori di h

Processo	h_c (W/m²K)
Convezione naturale	
Gas	2-25
Liquidi	50-1000
Convezione forzata	
Gas	25-250
Liquidi	100-20000

Trasmissione del calore:

- Conduzione
- Convezione
- **Irraggiamento**

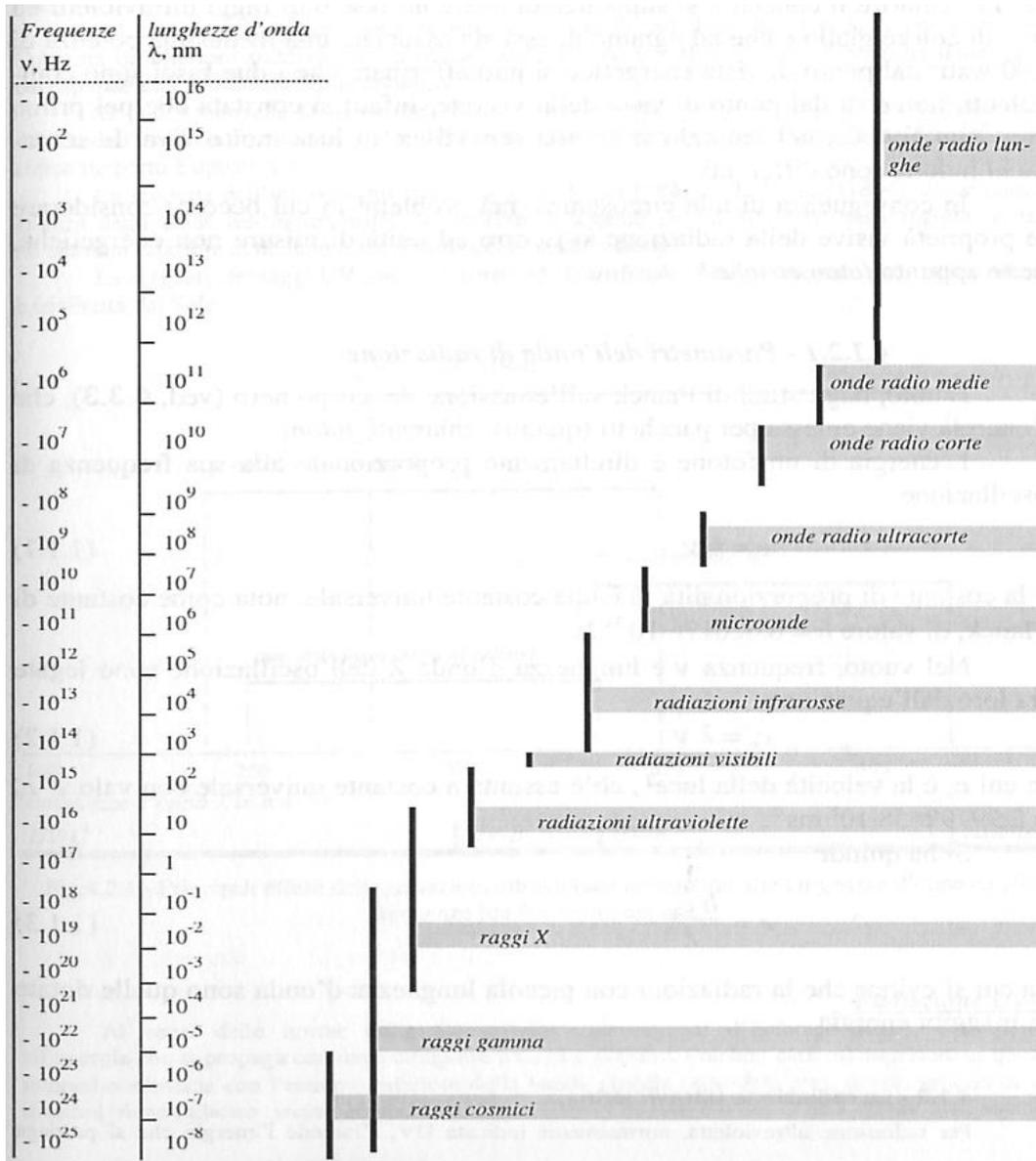
Irraggiamento è un altro fenomeno di trasmissione del calore, in particolare, legato all'energia interna di un corpo

Si consideri un corpo caldo collocato in una camera a vuoto le cui pareti sono a temperatura ambiente \longrightarrow : il corpo si raffredda e raggiunge l'equilibrio termico con l'ambiente, perdendo calore finché la sua temperatura non uguaglia quella delle pareti della camera. La trasmissione di calore tra il corpo e la camera, non potendo aver luogo per conduzione o convezione, poiché questi due fenomeni non si possono verificare nel vuoto, deve avvenire attraverso un altro fenomeno legato alla emissione di energia interna sensibile dal corpo: l'*irraggiamento*.



OSS: Affinchè ci sia scambio di calore per irraggiamento fra due superfici, è necessario che queste "si guardino" fra di loro

Quadro sinottico dello spettro delle radiazioni elettromagnetiche



La radiazione elettromagnetica che si identifica nella trasmissione di calore è la *radiazione termica*. Quest'ultima è la parte dello spettro elettromagnetico che va da 10^0 a 10^1 μm , ovvero il campo di radiazione infrarossa (IR).

Parametri dell'onda di radiazione

È noto, dagli studi di Planck sull'emissione del corpo nero che l'energia viene emessa per pacchetti (quanti), chiamati *fotoni*.

L'energia di un fotone è direttamente proporzionale alla sua frequenza di oscillazione

$$e = h \nu$$

e la costante di proporzionalità h è una costante universale, nota come costante di Planck, di valore $h = 6,626176 \cdot 10^{-34}$ Js.

Nel vuoto, frequenza ν e lunghezza d'onda λ dell'oscillazione sono legate fra loro dall'equazione

$$c_0 = \lambda \nu$$

in cui c_0 è la velocità della luce², ch'è assunta a costante universale con valore $c_0 = 2,99792458 \cdot 10^8$ ms⁻¹.

Si ha quindi

$$e = \frac{h c_0}{\lambda}$$

da cui si evince che la radiazioni con piccola lunghezza d'onda sono quelle dotate di maggior energia.

Legge di Wien – Legge di Planck

Legge di Wien

Fornisce il valore della lunghezza d'onda λ_m per la quale è massima l'emissione globale monocromatica

$$\lambda_m = \frac{b}{T}$$

con

$$b = 2,898 \cdot 10^{-3} \text{ m K}$$

costante universale, nota come *costante di spostamento di Wien*.

Legge di Planck

L'emissione globale monocromatica

$$M_{\lambda,0} = \frac{c_1}{\lambda^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)}$$

con

$$\begin{cases} c_1 = 3,7418 \cdot 10^{-16} \text{ W m}^2 \\ c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2} \text{ m K} \end{cases}$$

costanti universali, note come *prima e seconda costante di Planck*.

Legge di Wien

Mentre il picco della radiazione solare ha luogo a $\lambda = 2897.8/5762 = 0.50 \mu\text{m}$, quasi al centro del campo visibile, il picco di radiazione emessa da una superficie a temperatura ambiente ($T = 298 \text{ K}$) ha luogo a $\lambda = 9.72 \mu\text{m}$, nel campo infrarosso dello spettro. Infatti una stufa a resistenza elettrica comincia ad emettere energia per irraggiamento subito appena accesa, come si può constatare avvicinando le mani alla resistenza, tuttavia inizialmente la radiazione è completamente nel campo infrarosso e non può essere vista dagli occhi. Raggiunta la temperatura di circa 1000 K , la resistenza apparirà debolmente rossa, perché solo allora inizia ad emettere una quantità apprezzabile [circa $1 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$] di radiazione rossa visibile.

Cos'è un corpo nero

- Un corpo nero è un corpo ideale che emette la massima radiazione per ogni temperatura e lunghezza d'onda e assorbe tutta la radiazione incidente. Va fatta una distinzione tra il corpo nero ($\epsilon=\alpha=1$) ed una normale superficie di colore nero: la superficie che appare nera all'occhio assorbe tutta la radiazione che rientra nel campo del visibile ma non è detto che assorba tutte le radiazioni di tutte le lunghezze d'onda; pertanto non si può giudicare se una superficie approssima il comportamento del corpo nero sulla base della sola osservazione visiva

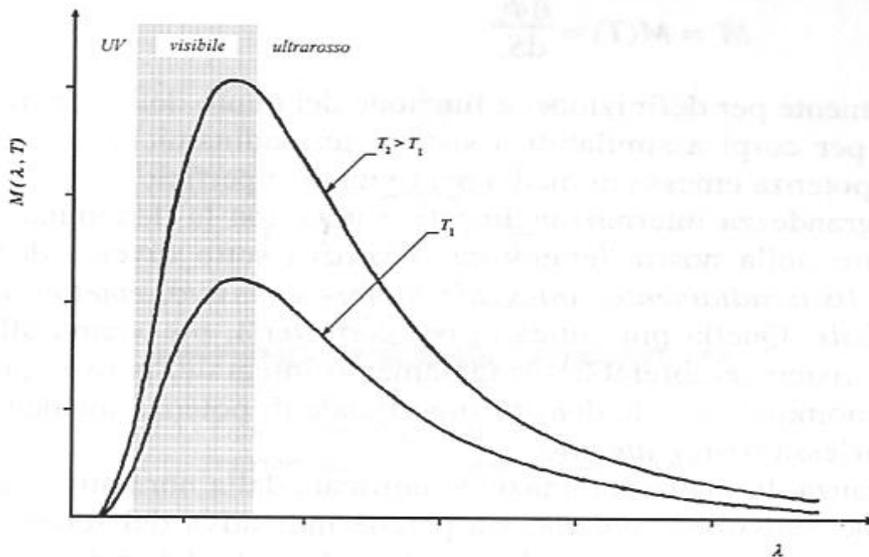
Legge di Stefan - Boltzmann

La potenza che una superficie emette per irraggiamento è detto potere emissivo Q . Al massimo Q può essere:

$$Q = \sigma T_s^4$$

Legge di Stephan-Boltzmann

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{K}^4\text{)}$$



Un corpo nero è un perfetto emettitore ed assorbitore di radiazione poiché emette la massima radiazione per ogni lunghezza d'onda λ e temperatura T ed assorbe tutta la radiazione incidente indipendentemente dalla direzione e lunghezza d'onda.

Andamento del diagramma di emissione di un corpo

condensato

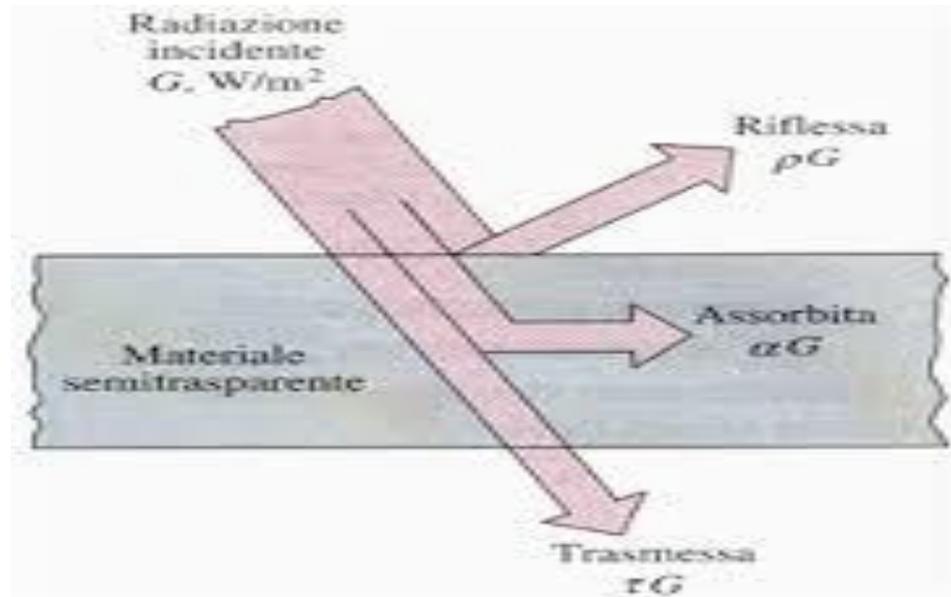
Emissività

Si definisce **emissività** di una superficie *il rapporto tra la radiazione emessa dalla superficie e la radiazione emessa dal corpo nero alla stessa temperatura*. L'emissività di una superficie si indica con ε , varia tra zero e uno ($0 \leq \varepsilon \leq 1$) ed è una misura di quanto una superficie reale approssima un corpo nero per il quale $\varepsilon = 1$.

Una superficie reale emette una quantità di radiazione inferiore pari a:

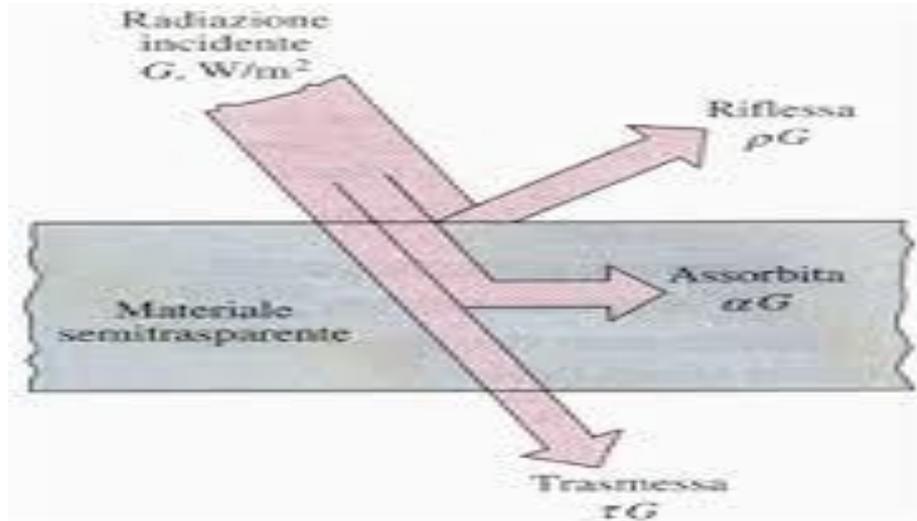
$$Q = \varepsilon \sigma T_s^4$$

Coefficienti di assorbimento riflessione e trasparenza



Tutti i corpi emettono continuamente radiazione in relazione alla loro emissività, perciò ogni corpo viene costantemente bombardato dalla radiazione che arriva da tutte le direzioni. *La radiazione incidente su una superficie per unità di area e per unità di tempo è detta irradiazione e si indica con G .*

Coefficienti di assorbimento riflessione e trasparenza



$$\alpha = G_{ass}/G \quad 0 \leq \alpha \leq 1$$
$$\rho = G_{rifl}/G \quad 0 \leq \rho \leq 1$$
$$\tau = G_{tras}/G \quad 0 \leq \tau \leq 1$$

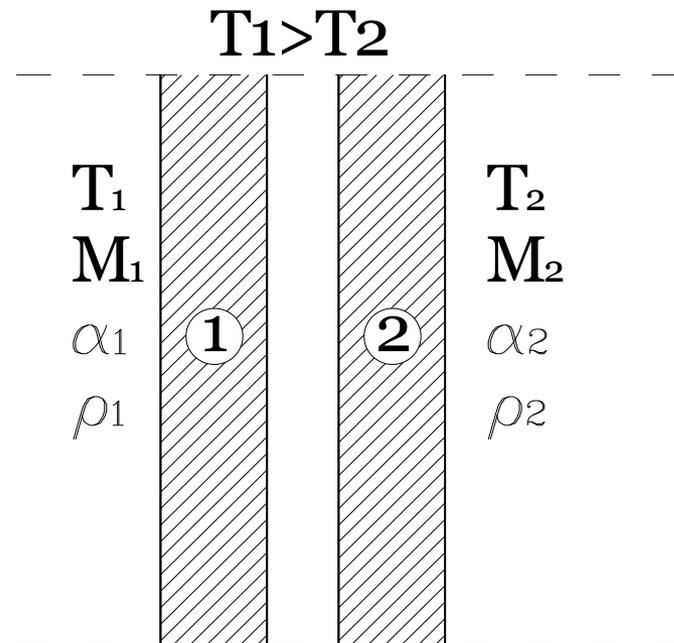
Per il primo principio della termodinamica la somma della radiazione assorbita, riflessa e trasmessa deve essere uguale alla radiazione incidente G , ne consegue che:

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

Il principio di Kirchoff

Supponiamo di avere due superfici infinitamente estese a temperature $T_1 > T_2$ vicine tra loro in modo che l'energia emessa da una venga assorbita dall'altra e viceversa. Si può costruire una successione di equazioni (emettanze e assorbimenti) per entrambi i corpi:

Consideriamo il fenomeno in regime stazionario poiché lo scambio di onde radiative è così rapido che è possibile considerare il fenomeno in regime stazionario sempre. Pertanto i due oggetti non cambiano nel tempo la loro temperatura e questo implica che tutto quello che assorbono riemettono.



Il Fattore di vista nel bilancio energetico

Siano quindi C_1 e C_2 i due corpi in esame, aventi rispettivamente superfici emittenti di area A_1 ed A_2 e temperatura T_1 e T_2 , con $T_1 > T_2$.

Poiché, per le ipotesi fatte, è

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= \alpha_1 \\ \varepsilon_2 &= \alpha_2 \end{aligned} \right\}$$

Essendo il fenomeno stazionario tutto ciò che viene assorbito viene riemesso altrimenti varia la T dei corpi

$$M_1 = \varepsilon_1 \sigma_0 T_1^4$$

$$M_2 = \varepsilon_2 \sigma_0 T_2^4$$

risulta che le potenze emesse da ognuno dei due corpi sono rispettivamente

$$\Phi_1 = A_1 \varepsilon_1 \sigma_0 T_1^4$$

$$\Phi_2 = A_2 \varepsilon_2 \sigma_0 T_2^4$$

Si focalizzi l'attenzione, adesso, sulla potenza $\Phi_{1 \rightarrow 2}$ che emessa da C_1 va ad incidere su C_2 .

Si potrà scrivere

$$\Phi_{1 \rightarrow 2} = F_{12} \Phi_1 = F_{12} A_1 \varepsilon_1 \sigma_0 T_1^4$$

essendo F_{12} un fattore, privo di dimensioni fisiche, che tiene conto della configurazione geometrica dei corpi e della porzione di angolo solido che il corpo C_2 intercetta rispetto a tutto l'angolo di emissione di C_1 . In altri termini, tiene conto di come il corpo C_1 "vede" il corpo C_2 .

Modello lineare

Il modello rappresentativo del fenomeno dello scambio termico per irradiazione fra due corpi grigi è non lineare.

Esistono però condizioni fenomenologiche che consentono di sostituirlo con uno lineare, rispondente all'espressione:

$$Q = h_r A (T_1 - T_2)$$

Analogo a quello determinato per la conduzione e la convezione.

Si tratta di apprezzare h_r , che prende il nome di coefficiente di scambio termico radiante o coefficiente d'irraggiamento e risulta:

$$h_r = h_r(T) = \alpha_1 \alpha_2 \sigma_o F_{12} (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2)$$

Tale modello risulta utilizzabile in condizioni di valori di temperatura vicini fra loro e di modesto livello

Trasmissione di calore per adduzione

L'adduzione è l'insieme di convezione e irraggiamento quando i due fenomeni termici sono regolati dalle stesse temperature

Quantità di calore scambiata globalmente dalla parete con l'ambiente:

$$q = q_c + q_r = h_c(T_p - T_a) + h_r(T_p - T_{mr})$$

dove:

h_c = coefficiente di convezione;

h_r = fattore di radiazione;

q_c = quantità di calore trasmessa per convezione;

q_r = quantità di calore trasmessa per radiazione.

Se si ritiene accettabile l'ulteriore ipotesi:

$$T_a = T_{mr}$$

Con:

T_a = Temperatura aria ambiente

T_{mr} = Temperatura media radiante

Si può scrivere:

$$q = (h_c + h_r)(T_p - T_a)$$

Coefficiente di adduzione

La somma tra il coefficiente di convezione ed il coefficiente di irraggiamento può porsi:

$$k = h_c + h_r$$

k è denominato *fattore di adduzione* ed il *flusso termico* si può calcolare tramite la relazione:

$$q = K \left(T_p - T_a \right)$$

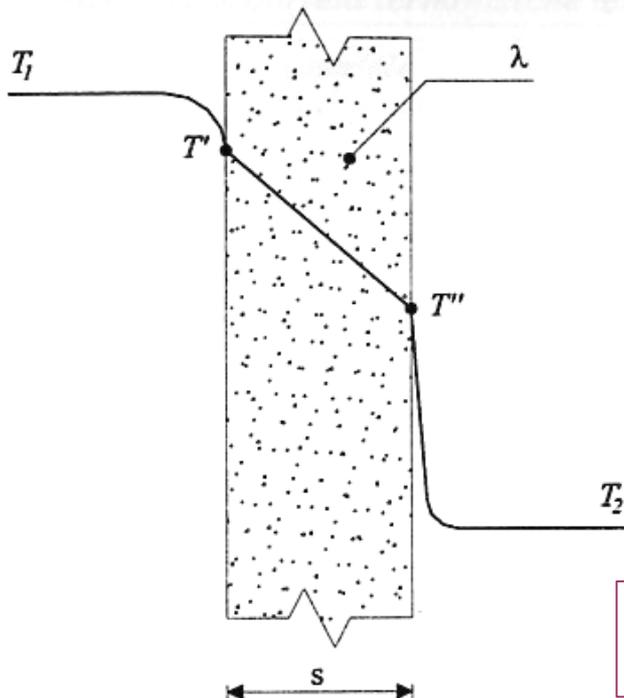
Trasmittanza di una parete

Quantità di calore q scambiata tra due fluidi aventi temperature T_1 e T_2 separati da una parete piana di dimensioni trasversali grandi rispetto allo spessore

Ritenute valide le ipotesi dell'adduzione, siano q_1 e q_2 i flussi termici ai confini della parete e q il flusso termico che attraversa la parete per effetto della conducibilità interna

Se il fenomeno si svolge in **regime stazionario**, le quantità di calore q_1 , q_2 , q sono fra loro uguali

$$q_1 = q_2 = q$$



$$(T_1 - T') = \frac{q}{k_1}$$

$$(T' - T'') = \frac{s \cdot q}{\lambda}$$

$$(T'' - T_2) = \frac{q}{k_2}$$

Andamento della temperatura attraverso una parete piana tra due fluidi

Sommando membro a membro e semplificando, si ha:

$$T_1 - T_2 = q \left(\frac{1}{k_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{k_2} \right)$$

Il *flusso termico per unità di superficie* è fornito dalla:

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{k_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{k_2}}$$

Il termine **H** è definito *trasmissione* della parete:

$$H = \frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{s}{\lambda} + \frac{1}{k_2}}$$

Il *flusso termico globale* q è dato da:

$$q = H(T_1 - T_2)$$

$$q = \frac{(T_1 - T_2)}{R_{\text{tot}}}$$