



Università degli Studi  
**Mediterranea**  
di Reggio Calabria

***FISICA TECNICA***

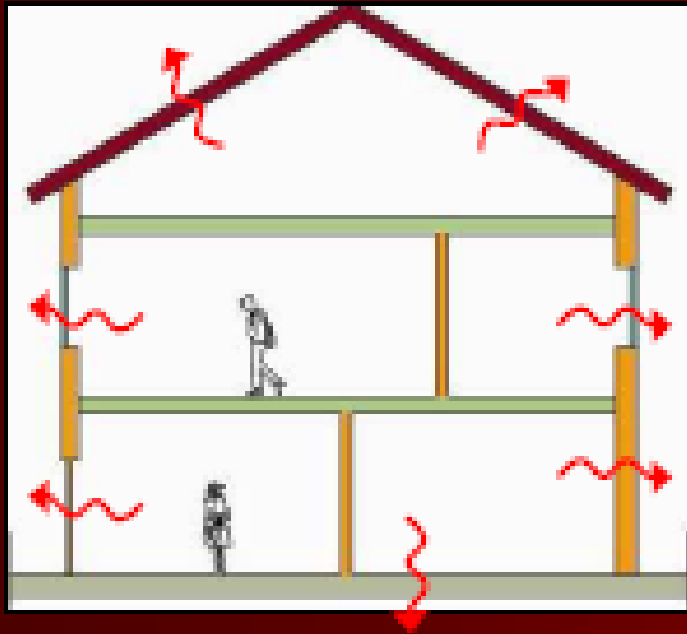
Prof. Ing. Marina Mistretta

# ***Trasmissione del calore***

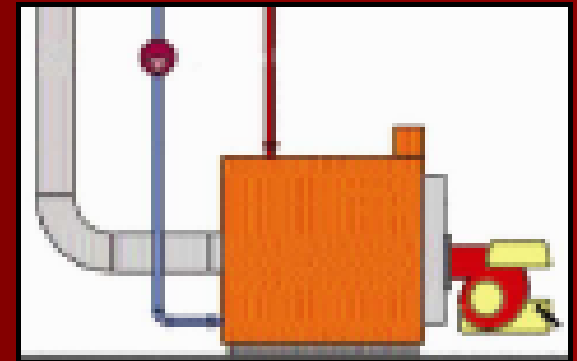
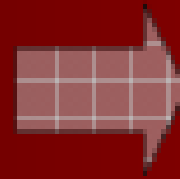
a.a. 2018/2019

L'edificio è un sistema aperto che scambia con l'ambiente massa ed energia:

- energia termica (calore)
- massa d'aria



Edificio



Impianto

# Introduzione alla trasmissione del calore

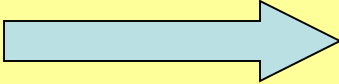
Quando lo scambio di energia avviene in virtù di una differenza di temperatura si parla di trasmissione del calore:

1. Il calore ceduto da un sistema deve essere uguale al calore ricevuto dall'altro (principio di conservazione dell'energia);
2. Il calore viene trasferito spontaneamente dal sistema a temperatura maggiore a quello a temperatura minore.

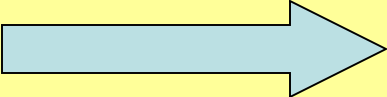
# Introduzione alla trasmissione del calore

- Sebbene calore (inteso come trasferimento di energia) e temperatura sono strettamente connessi sono di diversa natura.

## Temperatura.

- È caratterizzata solo da una grandezza  è una grandezza *scalare*.

Il calore ha una direzione, un verso e una grandezza

 è una grandezza *vettoriale*.

- Abbiamo allora bisogno di un sistema di riferimento di coordinate cartesiane.

# Introduzione alla trasmissione del calore

- Trasmissione del calore
  - Passaggio di energia termica in un sistema dove sussiste una condizione di non equilibrio termico interno o quando tale mancanza di equilibrio sussiste tra sistema e contorno.
- Le modalità di trasmissione sono:
  - Conduzione
  - Convezione
  - Irraggiamento

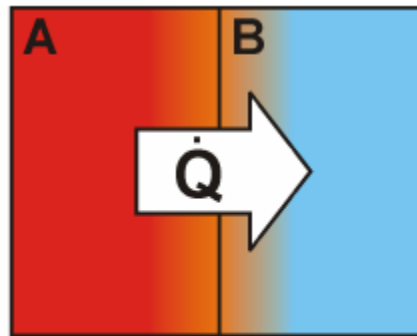
# Conduzione

È un fenomeno fisico mediante il quale il calore tra due corpi viene trasmesso tramite contatto (senza trasporto di massa).

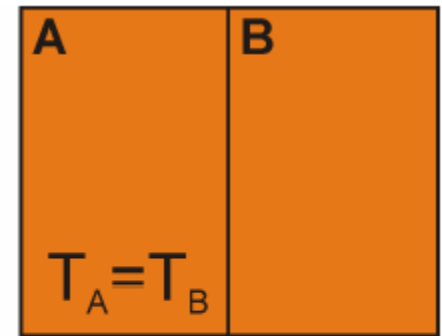
La temperatura di un corpo è proporzionale all'energia cinetica posseduta dalle sue particelle. Tanto più esse si muovono velocemente tanto maggiore è la temperatura dell'oggetto.



FASE 1



FASE 2



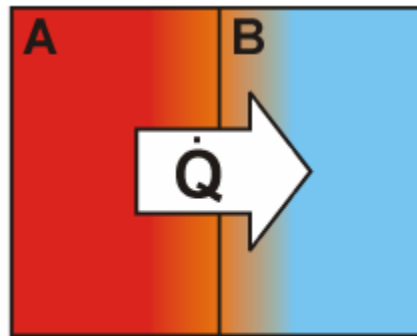
FASE 3

# Conduzione

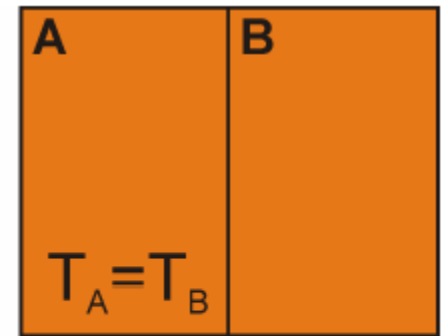
- Se si hanno due corpi con temperature diverse, conseguentemente avranno anche energie cinetiche differenti. Mettendo i due elementi a contatto, per ottenere un equilibrio del sistema, le molecole aventi energia cinetica maggiore cederanno una parte di essa a quelle con energia minore.
- Lo scambio di energia può avvenire per urto elastico o per diffusione degli elettroni, i più veloci andranno dalle zone più calde a quelle più fredde.



FASE 1



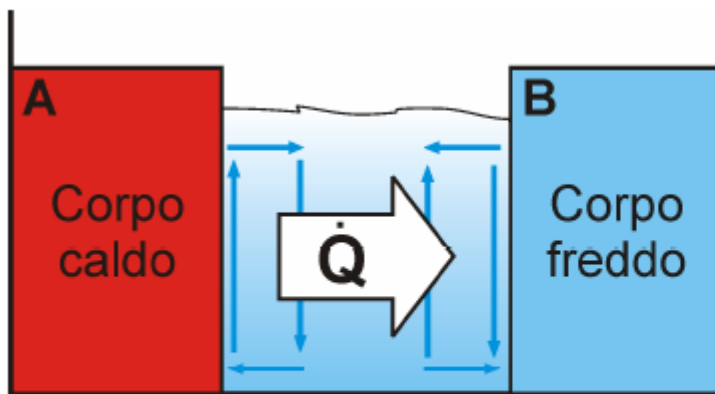
FASE 2



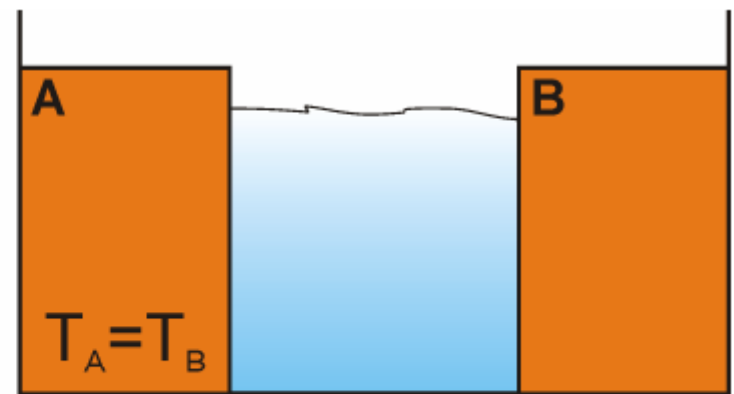
FASE 3

# 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

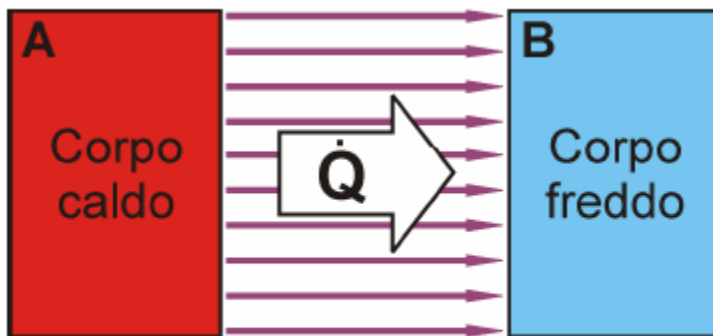


FASE 2

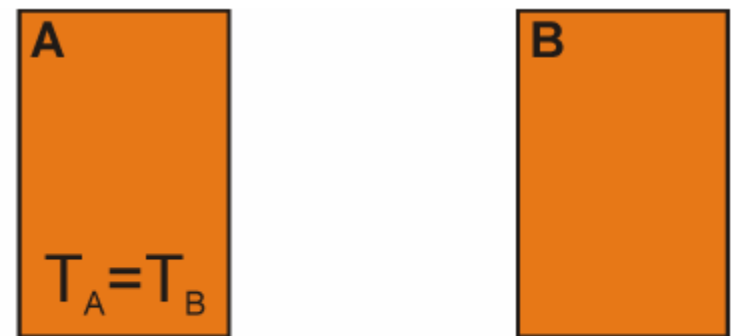


# Irraggiamento

- Fenomeno di emissione di radiazione elettromagnetica dalla superficie di un corpo che si trova ad una certa temperatura ( $\neq 0^\circ \text{ K}$ ).
- Viene emessa in tutte le direzioni e anche nel vuoto, pertanto la sua entità non dipende dal tipo di mezzo materiale interposto



FASE 1



FASE 2

# Conduzione

## Ipotesi:

Il mezzo attraverso il quale avviene la conduzione deve essere:

1. Continuo

in ogni punto ha le stesse caratteristiche chimico-fisiche;

2. Isotropo

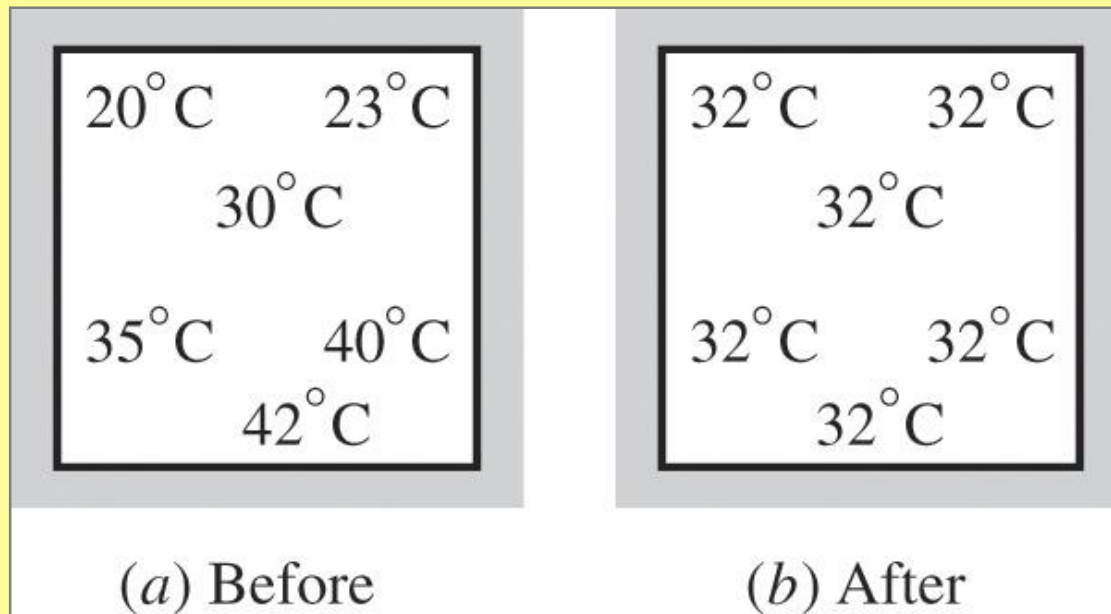
ha lo stesso comportamento in ogni direzione;

3. Omogeneo

è composto da una sola sostanza.

# Conduzione

- ✓ Il passaggio del calore da un punto all'altro del sistema deriva dalla mancanza di equilibrio termico al suo interno
- ✓ Ne consegue che la sua temperatura varia in funzione della posizione considerata e, in generale, del tempo.

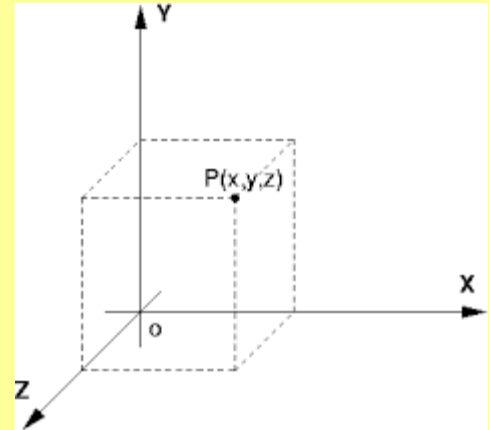


# Conduzione

- ✓ L'elemento fondamentale dello studio della trasmissione del calore è costituito dalla determinazione della distribuzione della temperatura, esprimibile:

$$T = f(x, y, z, \tau)$$

*Esprime un campo scalare continuo all'interno del quale la variazione di temperatura è graduale.*



# Conduzione

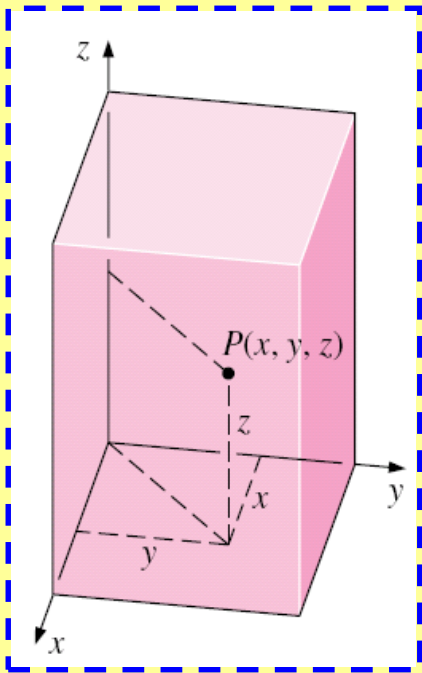
$$T = f(x, y, z, \tau)$$

Tale campo è detto **campo di temperatura tridimensionale non stazionario**.

Se la temperatura del corpo non varia nel tempo il campo di temperatura si dice stazionario.

Si ha allora che:

$$T = f(x, y, z); \quad \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0$$



# Conduzione

$$T = f(x, y, z, \tau)$$

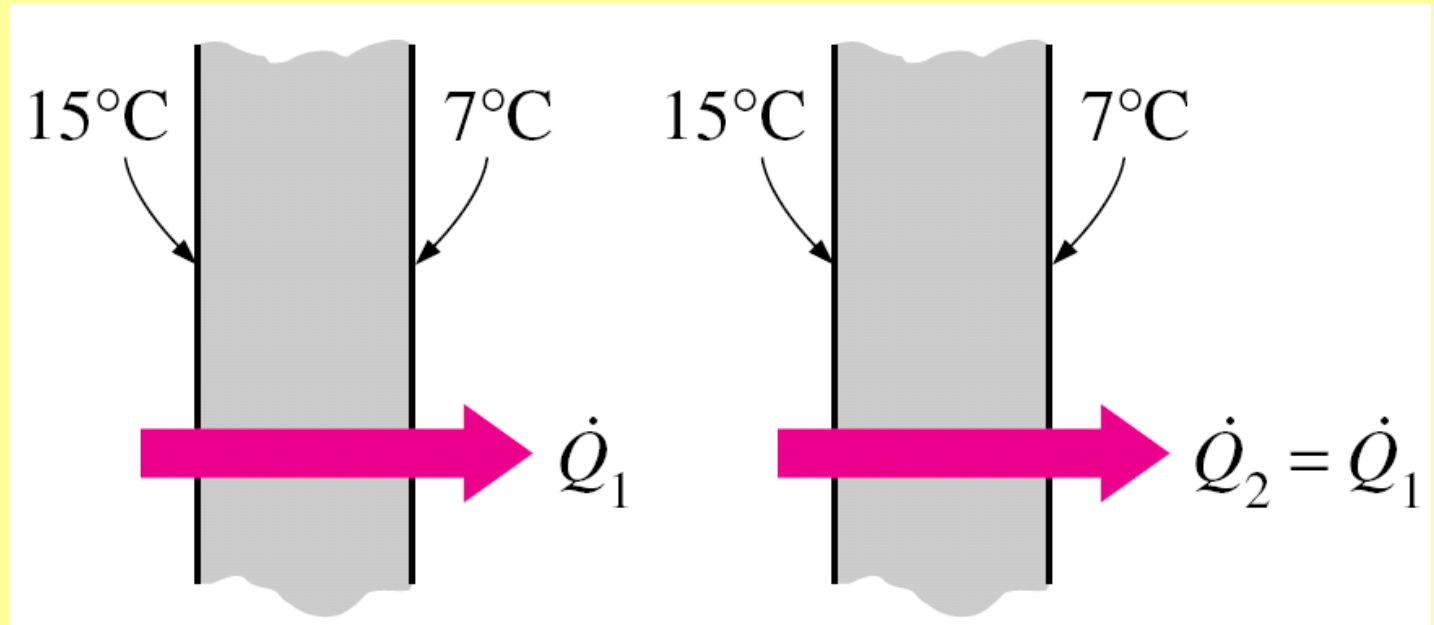
Il campo di temperatura quindi può essere funzione di tutte le coordinate o soltanto di due o una.

Un campo di temperatura monodimensionale stazionario ha l'espressione:

$$T = f(x); \quad \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$$

## Campo di temperatura monodimensionale stazionario

$$T = f(x); \quad \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} = 0$$



# Legge di Fourier della conduzione

$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{dT}{dx}$$

$\lambda$  è detto **coefficiente di *conducibilità*** del materiale che compone il sistema e indica la capacità del materiale a condurre calore.

$\lambda$  è il termine di proporzionalità fra il flusso termico specifico ed il gradiente di temperatura.

**In generale il valore di  $\lambda$  non è costante ma varia in funzione della temperatura.**

$$\lambda \cong \lambda_0 \cong \text{costante}$$



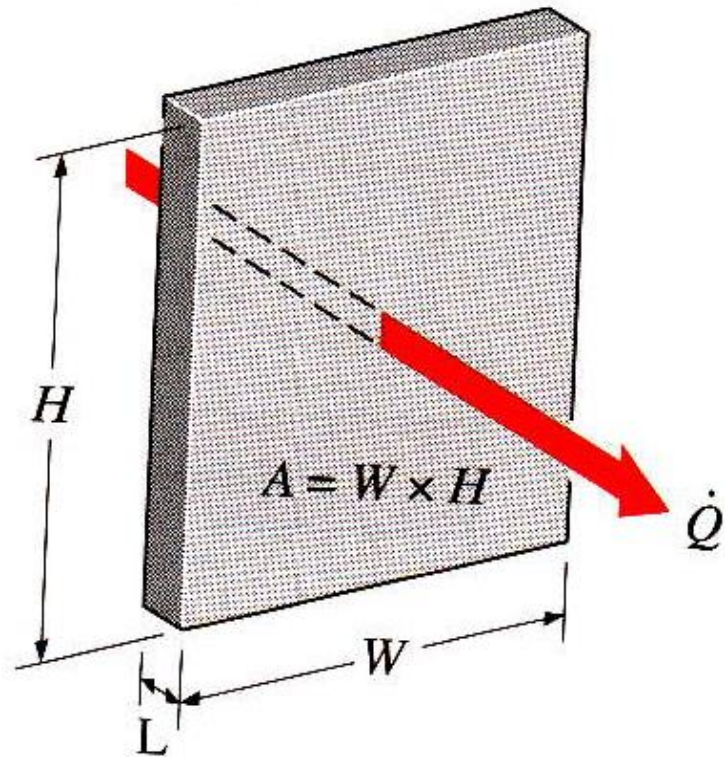
# Legge di Fourier della conduzione

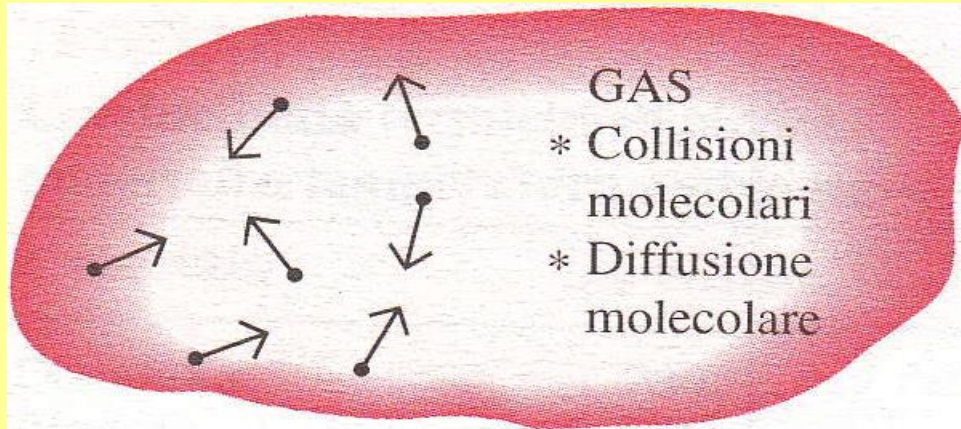
$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{dT}{dx}$$

Si può affermare che la potenza termica trasmessa per conduzione attraverso una parete è direttamente proporzionale alla variazione di temperatura e inversamente proporzionale allo spessore della parete.

Il calore si trasmette nel verso delle temperature decrescenti e il gradiente di temperatura  $dT$  diventa negativo quando la temperatura diminuisce lungo  $x$ . Quindi si aggiunge il segno negativo (-) per indicare che  $Q$  è positivo ed è di segno opposto a  $dT$

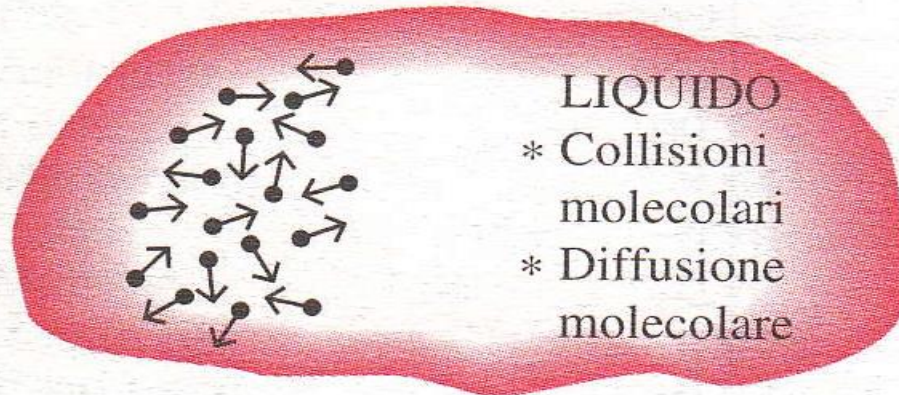
L'area della superficie di scambio termico è sempre valutata ortogonalmente alla direzione lungo la quale avviene la trasmissione di calore





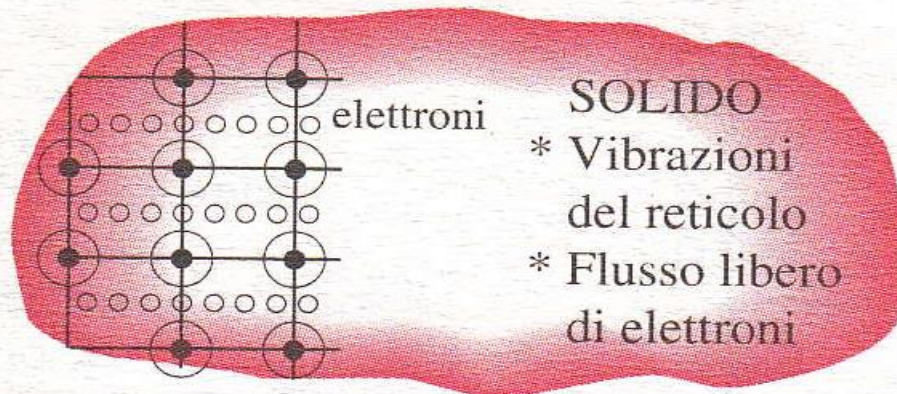
### GAS

- \* Collisioni molecolari
- \* Diffusione molecolare



### LIQUIDO

- \* Collisioni molecolari
- \* Diffusione molecolare



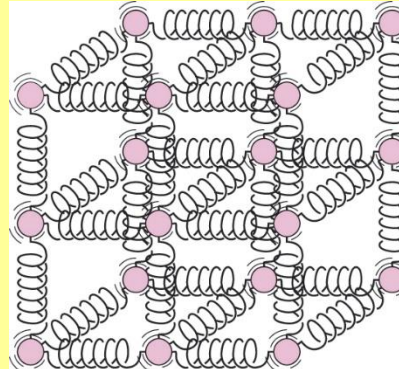
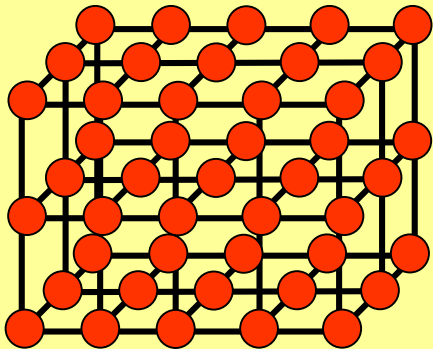
### SOLIDO

- \* Vibrazioni del reticolo
- \* Flusso libero di elettroni

# Conducibilità termica

Nella teoria della trasmissione del calore, un solido viene studiato come un insieme di atomi disposti in una struttura periodica chiamata reticolo e di elettroni liberi. Il trasporto di energia termica nel solido è quindi dovuto a due effetti:

1. la migrazione degli elettroni liberi
2. onde di vibrazione del reticolo (vibrazioni elastiche). Tali effetti sono additivi e quindi la conducibilità termica è somma di una componente elettronica ed una di reticolo



# Conducibilità termica

- Poiché la conducibilità legata agli elettroni liberi è direttamente proporzionale alla conducibilità elettrica, nei metalli puri che presentano una conducibilità elettrica alta, essa prevale rispetto alla componente dovuta alle onde di vibrazione del reticolo (che è trascurabile).
- Per i solidi non metallici il valore della conducibilità dipende essenzialmente dalle onde di vibrazione del reticolo.
- I solidi a struttura cristallina, cioè molto ordinati, come il quarzo, hanno valori di conducibilità termica più alti rispetto a materiali amorfi come il vetro.  
Esempi: diamante, ossido di berillio, che presentano una conducibilità termica maggiore di un solido metallico come l'alluminio.

# Conducibilità termica

- Per quanto riguarda lo stato fluido, la maggiore distanza intermolecolare rende il trasporto di energia termica attraverso le interazioni tra le particelle meno intenso rispetto ai solidi. La conducibilità nei liquidi è legata a:
  - numero di particelle per unità di volume
  - velocità media di agitazione delle particelle
  - percorso libero medio che rappresenta la distanza media percorsa da una molecola senza collisioni.
- I peggiori conduttori sono quindi i gas per i quali la conducibilità cresce al crescere della temperatura
- I migliori conduttori sono i metalli per i quali generalmente la conducibilità decresce al crescere della temperatura.

# Coefficiente di conducibilità termica

Per  $\lambda$  decrescente si passa da materiali conduttori a materiali isolanti.

<b>Materiale</b>	<b><math>\lambda</math> (W/mK)</b>
Acciaio	52
Acciaio inox	17
Acqua liquida in quiete	0.60
Acqua pesante da 10°C a 100°C	0.56 ÷ 0.65
Alcool	0.21
Alluminio	220
Amianto	0.113
Aria secca in quiete	0.026
Argento	420
Asfalto	0.698
Basalto	1.27 ÷ 3.5
Bitumi	0.17

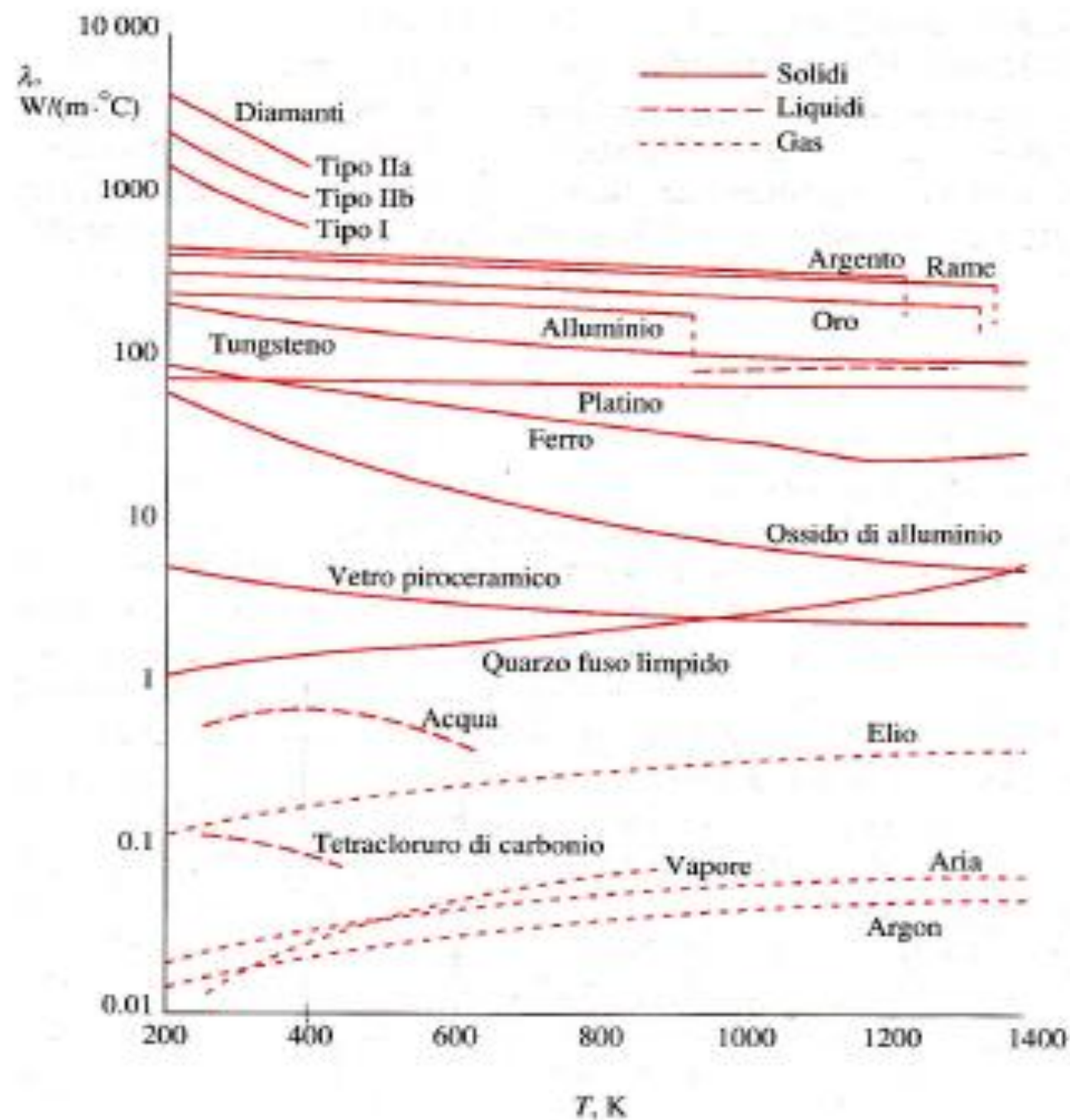
# Coefficiente di conducibilità termica

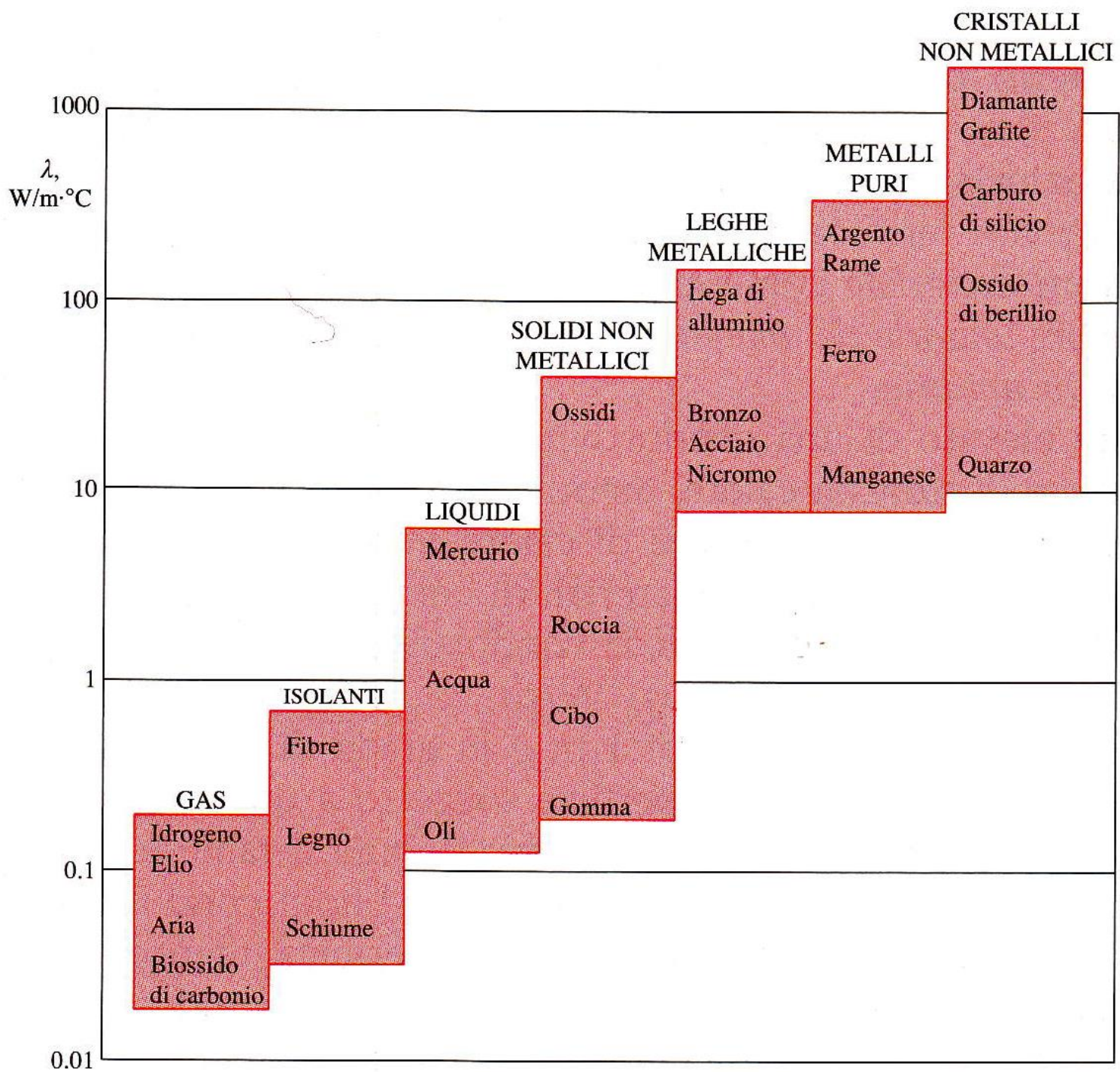
Bronzo	58 ÷ 65
Calcare	1.6 ÷ 3.5
Carbone	0.14 ÷ 0.17
Carbone in polvere	0.12
Carta e cartone	0.14 ÷ 0.23
Cartongesso in lastre	0.21
Cauciù	0.13 ÷ 0.23
Celluloide	0.35
Cellulosa compressa	0.24
Cemento in polvere	0.07
Cenere	0.069
Compensato	0.109
Creta	0.90
Dolomite	1.8
Ferro elettrolitico	87
Gesso	0.4
Ghiaccio a 0°C	2.22
Ghisa	50
Glicerina	0.220
Gomma dura	0.163

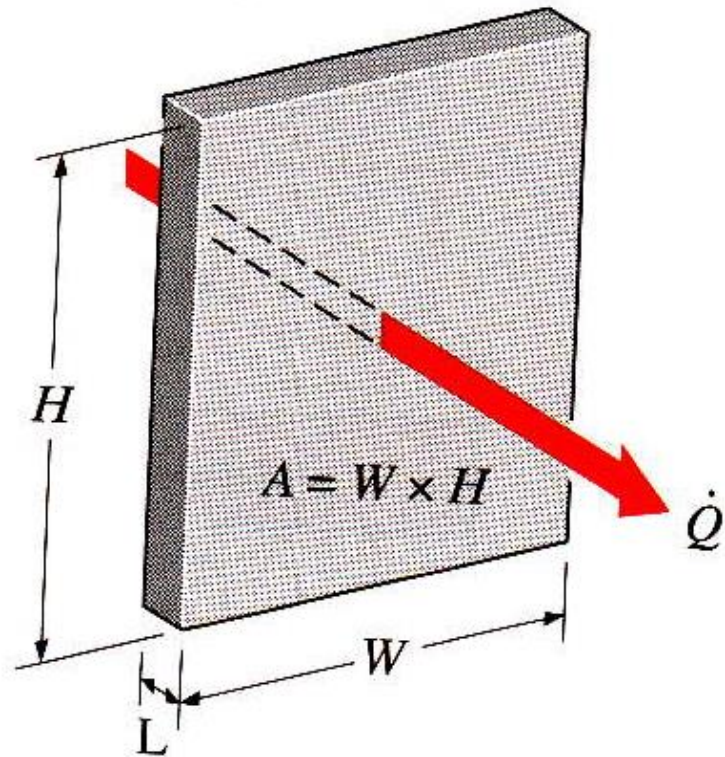


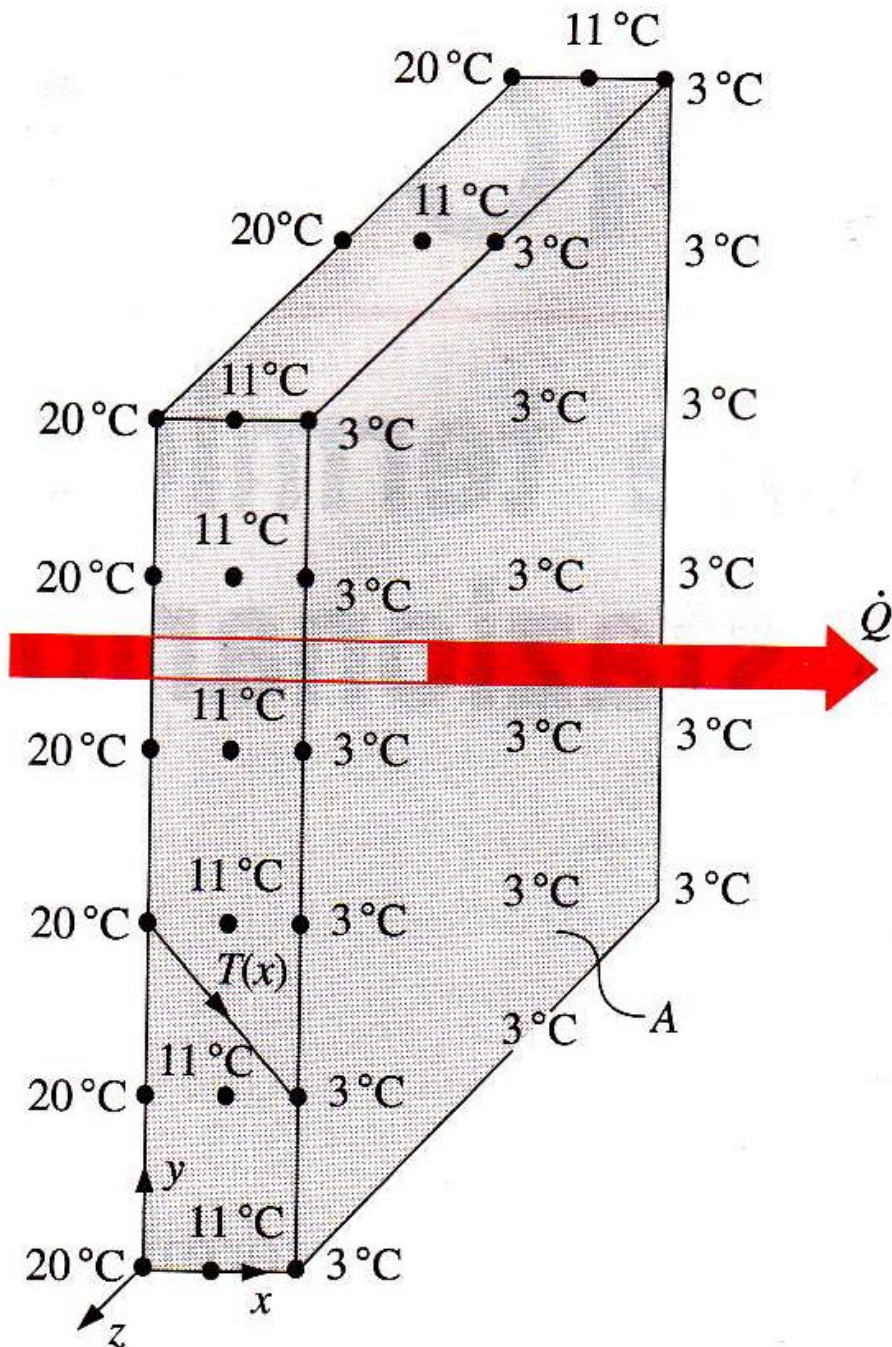
# Coefficiente di conducibilità termica

Grafite	4.9
Granito	3.18 ÷ 4.1
Intonaco di calce e gesso	0.70
Laterizi: mattoni pieni, forati, leggeri	0.25 ÷ 1
Lana	0.038
Lava	2.9
Leghe di alluminio	160
Legno di abete	0.12
Legno di acero	0.18
Legno di quercia	0.22
Manganina	23
Marmo	2.1 ÷ 3.5
Mercurio liquido a 0° C	8.13
Mercurio liquido a 60° C	9.64
Mercurio liquido a 120° C	10.92
Mercurio liquido a 160° C	11.6
Mercurio liquido a 222° C	12.78
Mica	0.523
Neve appena caduta fino a 3 cm	0.06
Neve soffice a strati da 3 a 7 cm	0.12
Neve moderatamente compatta da 7 a 10 cm	0.23
Neve compatta a strati da 20 a 40 cm	0.7
Nichel	58 ÷ 65
Oli e petroli	0.12 ÷ 0.17
Oro	299









Flusso termico monodimensionale attraverso una parete poiché la temperatura della parete varia in una direzione soltanto.

# Conduzione

Bilancio termico:

$$\dot{Q}_e - \dot{Q}_u = \dot{Q}_{acc}$$

$$\dot{Q}_e - \dot{Q}_u = \frac{dE_p}{dt}$$

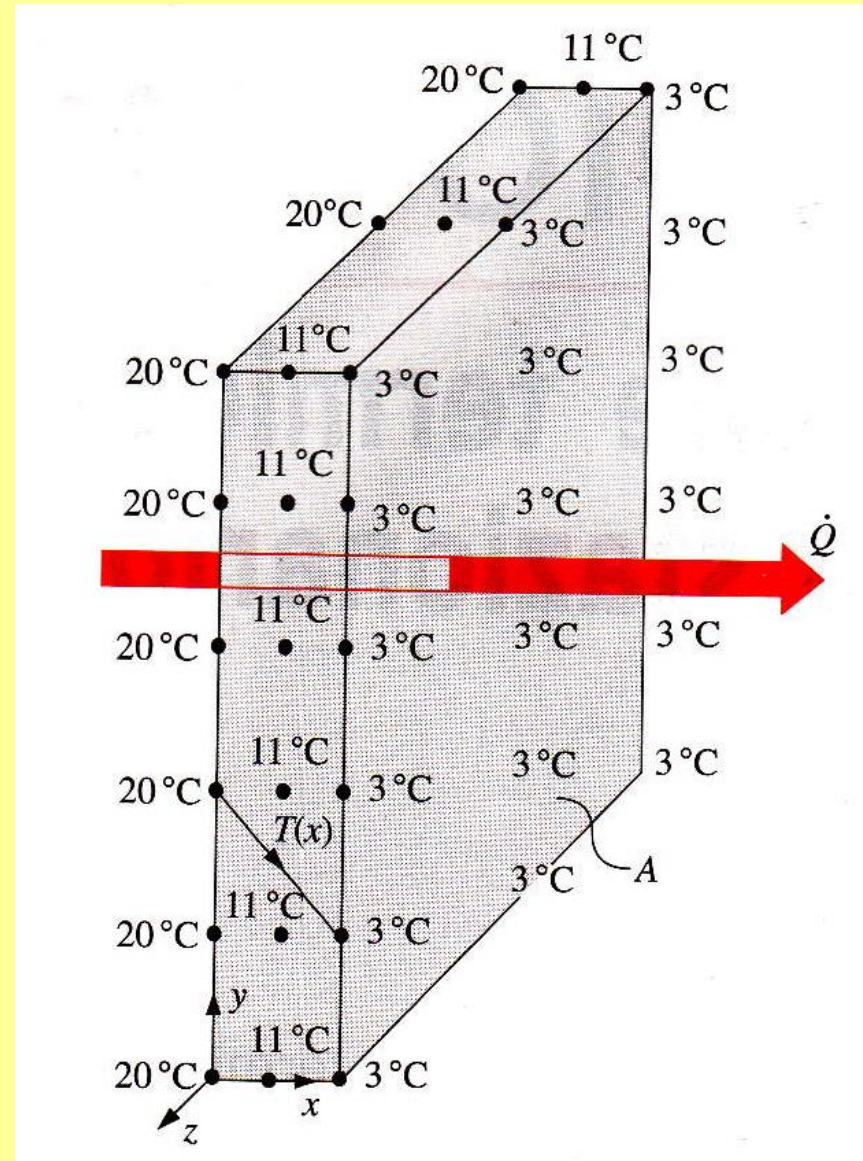
*In condizioni stazionarie*

$$dE_p/dt = 0$$

Quindi:

$$\dot{Q}_e - \dot{Q}_u = 0$$

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_u$$

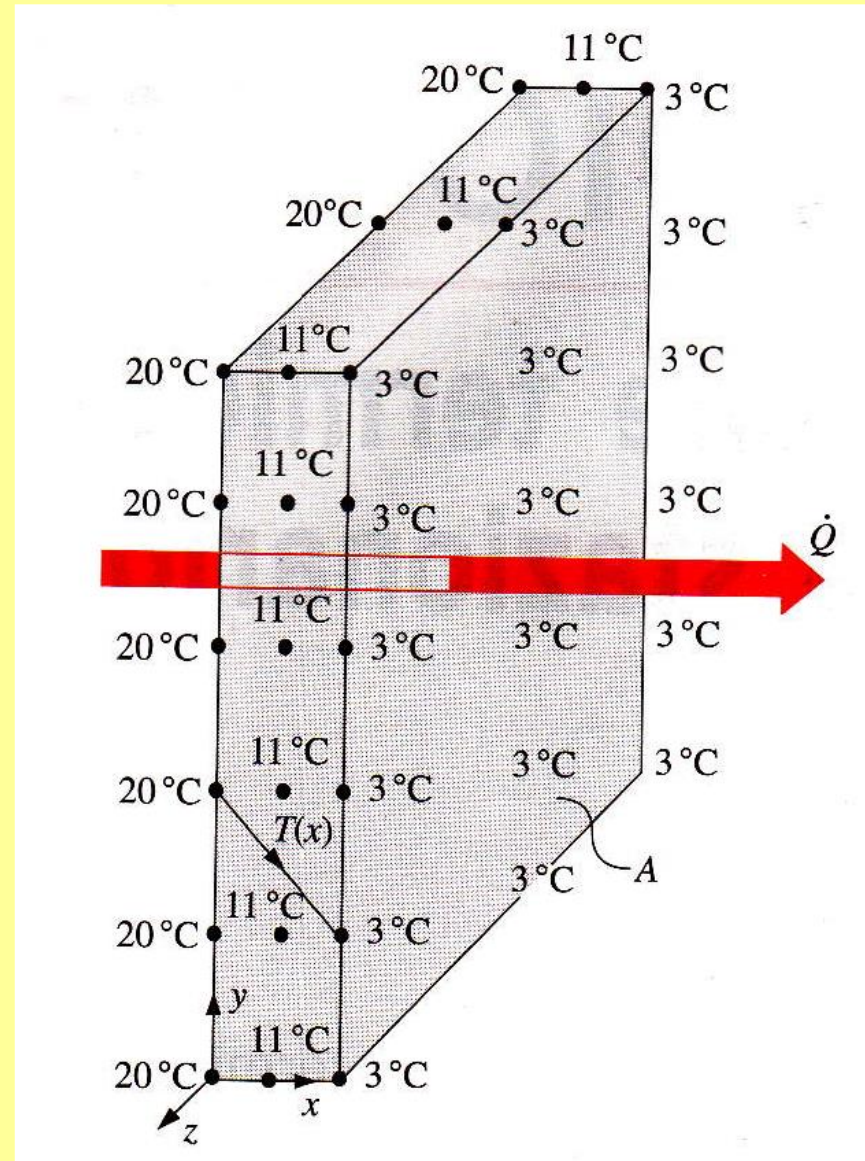


# Conduzione

*In condizioni stazionarie*

$$\dot{Q}_e = \dot{Q}_u$$

La potenza termica trasmessa per conduzione attraverso la parete si mantiene costante

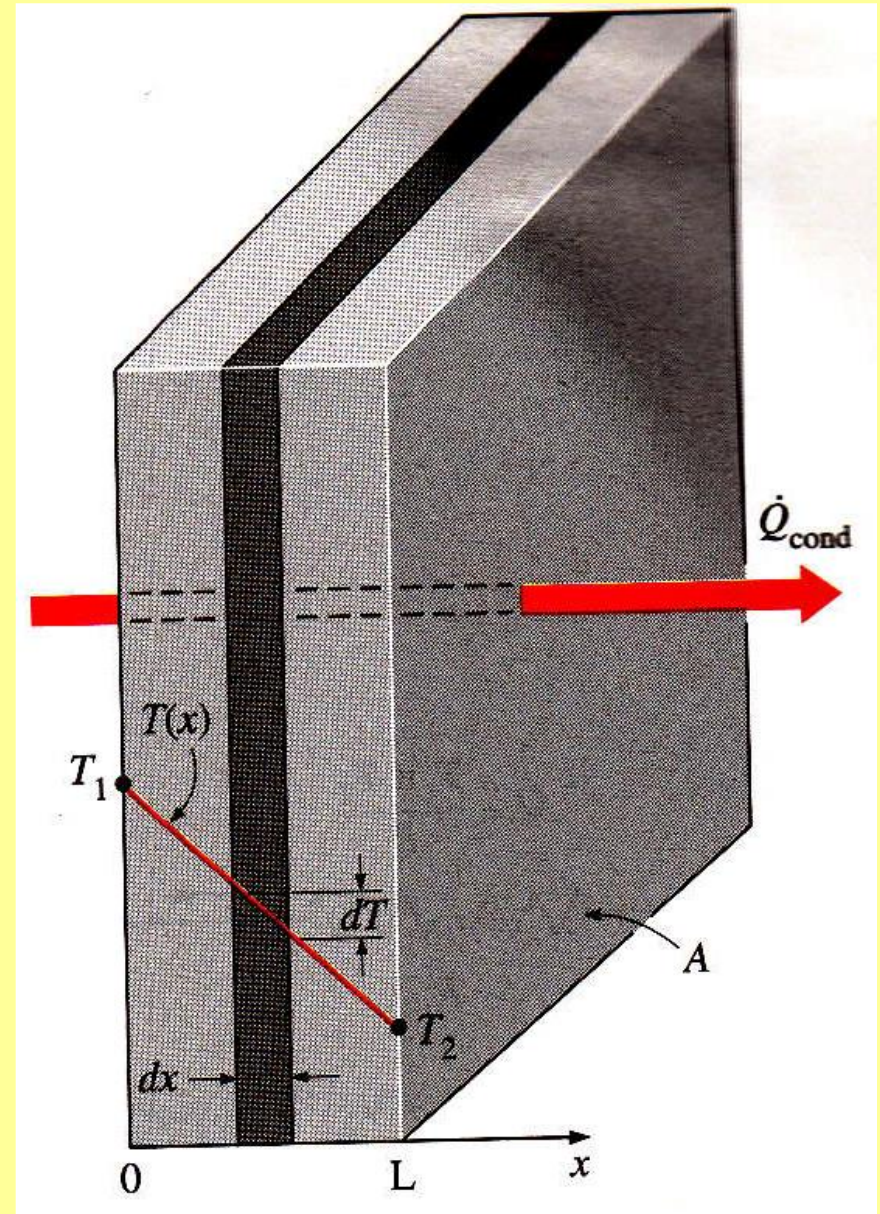


# Legge di Fourier della conduzione

$$\dot{Q} = -\lambda A \frac{dT}{dx}$$

$$\dot{q} = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

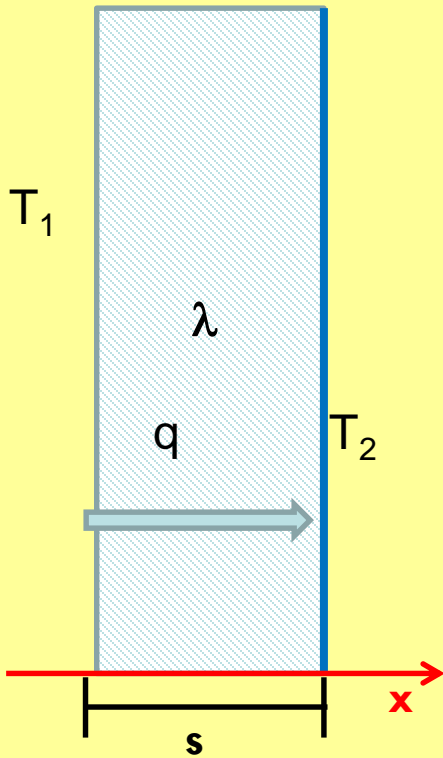
Legge di variazione della temperatura lungo  $x$





# Esempio n.1

## 1. La conduzione stazionaria in uno strato piano semplice



Si consideri una parete di materiale omogeneo ed isotropo, delimitata da due superfici piane e parallele, di estensione infinita, mantenute a temperatura costante ed uniforme e conducibilità costante ( $T_1 > T_2$ ).

In questo caso l'equazione si riduce a: (flusso monodirezionale)

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

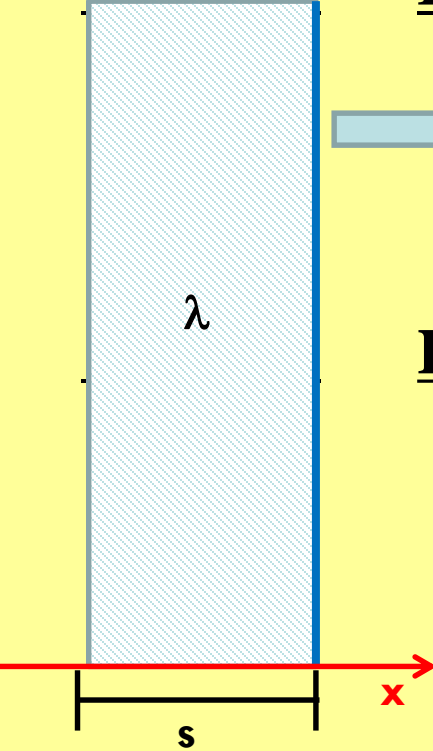
$$dT = -\frac{q}{\lambda} dx; \quad \int_{T_1}^{T_2} dT = -\frac{q}{\lambda} \int_0^s dx; \quad T_2 - T_1 = -\frac{q}{\lambda} s; \quad T_1 - T_2 = \frac{q}{\lambda} s;$$

$$q = \frac{\lambda}{s} (T_1 - T_2) \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

# Esempio n.1

La conduzione stazionaria in uno strato piano semplice


Flusso termico


$$q = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

Legge di variazione della temperatura

$$dT = -\frac{q}{\lambda} dx;$$

$$\int_{T_1}^T dT = -\frac{q}{\lambda} \int_0^x dx; \quad T - T_1 = -\frac{q}{\lambda} x; \quad T - T_1 = -\frac{q}{\lambda} x;$$

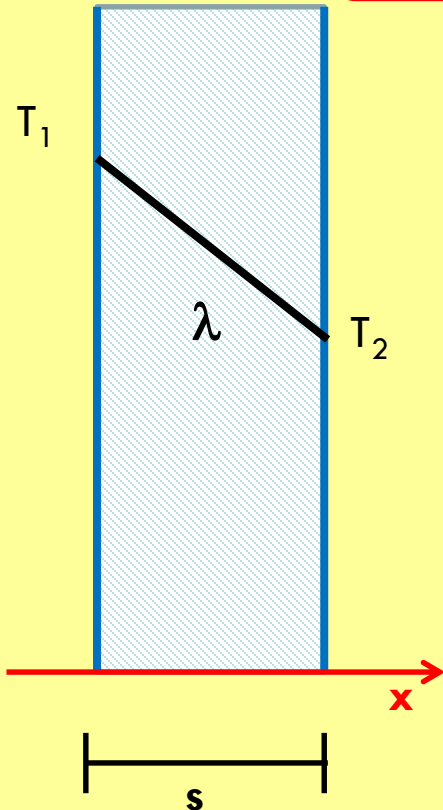

$$T(x) = T_1 - \frac{q}{\lambda} x$$

# Esempio

Conduzione stazionaria in uno strato piano semplice

**Essendo**

$$T(x) = T_1 - \frac{q}{\lambda} x$$



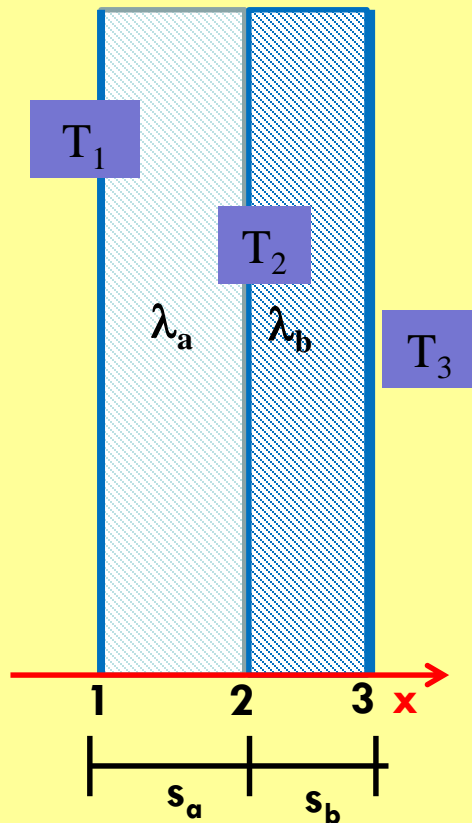
$$q = \frac{\lambda}{s} (T_1 - T_2) \quad \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

# Esempio n.2

## Conduzione stazionaria in uno strato piano multiplo

Si consideri una parete costituita da due strati di materiali a e b, di spessori diversi tra loro.

Poiché lo strato complessivo non è omogeneo, bisogna studiare separatamente i due strati.



**Strato  $s_a$**

$$q_a = -\lambda_a \frac{dT}{dx} = -\lambda_a \left( \frac{T_2 - T_1}{s_a} \right) = \lambda_a \left( \frac{T_1 - T_2}{s_a} \right)$$

$$T(x) = T_1 - \frac{q}{\lambda} x$$

$$T_a = \left( \frac{T_2 - T_1}{s_a} \right) x + T_1$$

# Esempio n.2

Conduzione stazionaria in uno strato piano multiplo

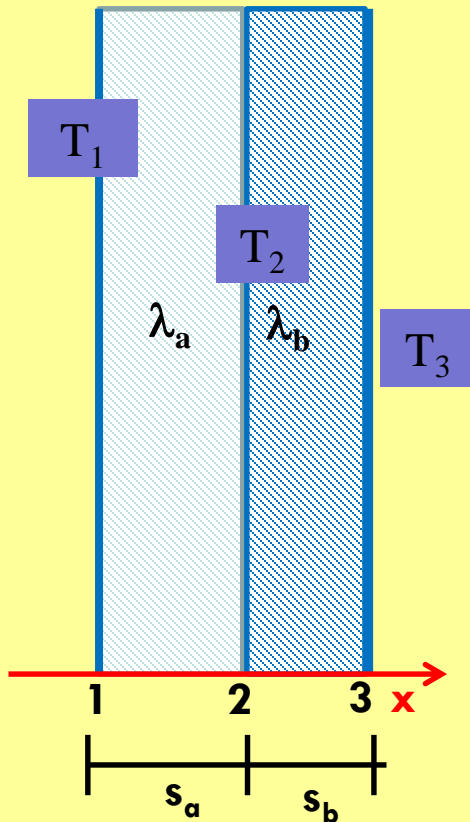
**Strato  $s_a$**

Con analogo ragionamento si ha:

$$q_b = -\lambda_b \frac{dT}{dx} = -\lambda_b \left( \frac{T_3 - T_2}{s_b} \right) = \lambda_b \left( \frac{T_2 - T_3}{s_b} \right)$$

Ricordando la legge di variazione della temperatura lungo  $x$ :

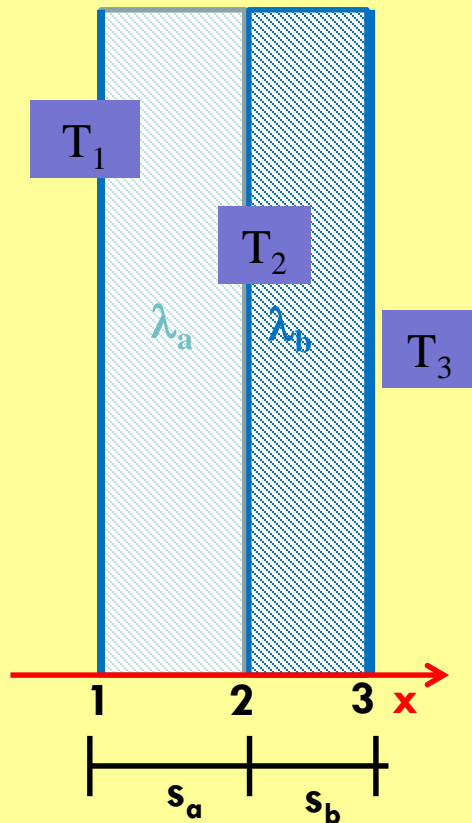
$$T_b = \left( \frac{T_3 - T_2}{s_b} \right) \underline{(x - s_a)} + T_2$$



# Esempio n.2

Conduzione stazionaria in uno strato piano multiplo

$$T_a = \left( \frac{T_2 - T_1}{s_a} \right) x + T_1 \quad T_b = \left( \frac{T_3 - T_2}{s_b} \right) (x - s_a) + T_2$$



$$(T_1 - T_2) = \frac{q_a s_a}{\lambda_a}$$

$$(T_2 - T_3) = \frac{q_b s_b}{\lambda_b}$$

ma  $q = q_a = q_b$  in regime stazionario

Sommando membro a membro le due equazioni si ottiene:

$$(T_1 - T_2) + (T_2 - T_3) = q \left( \frac{s_a}{\lambda_a} + \frac{s_b}{\lambda_b} \right)$$

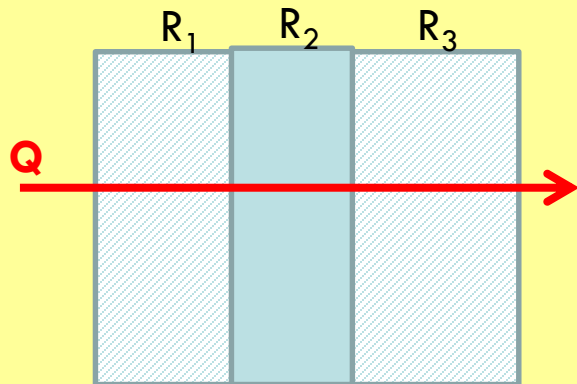
$$q = \frac{(T_1 - T_3)}{\left( \frac{s_a}{\lambda_a} + \frac{s_b}{\lambda_b} \right)}$$

Resistenza  
conduttiva

# Resistenza termica alla conduzione

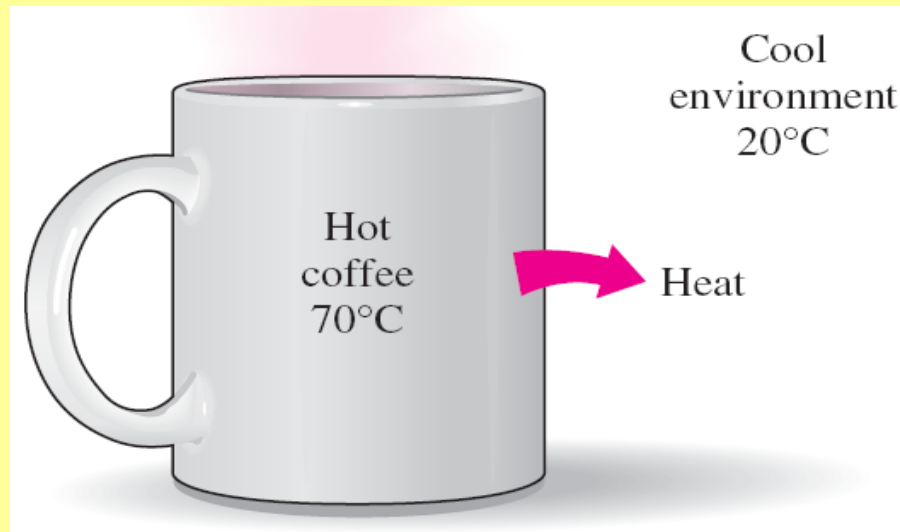
$$\dot{Q} = A * \frac{T_1 - T_2}{\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2}} = A * \frac{T_1 - T_2}{R_1 + R_2}$$

La resistenza termica di un mezzo dipende dalla geometria e dalle caratteristiche termiche del mezzo.



$$R_{tot} = R_1 + R_2 + R_3$$

# Cos'è la Convezione



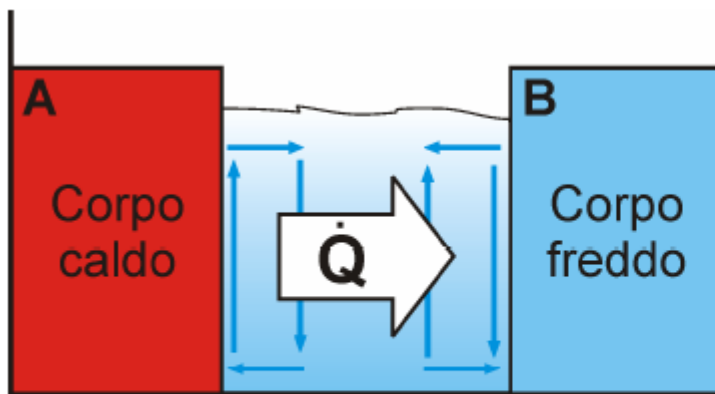
Il calore si disperde nel verso delle temperature decrescenti (dall'ambiente più caldo verso quello più freddo):

- 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

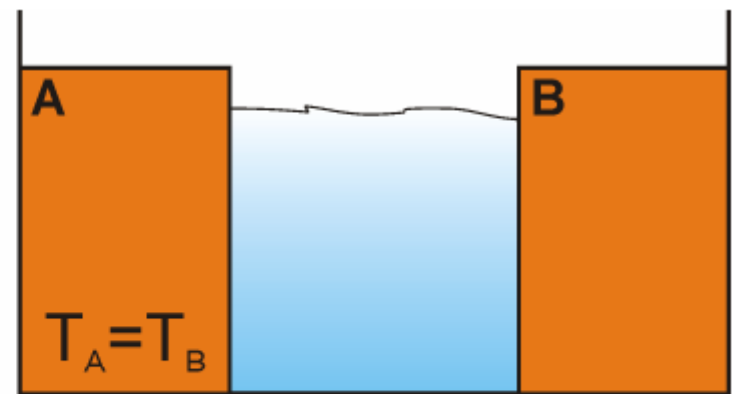


# Convezione

- 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.

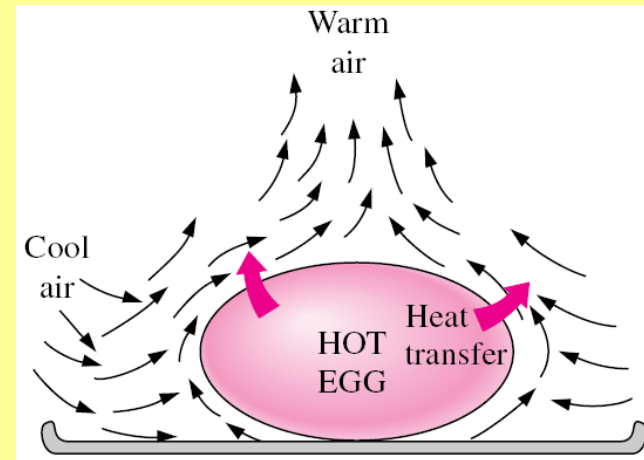
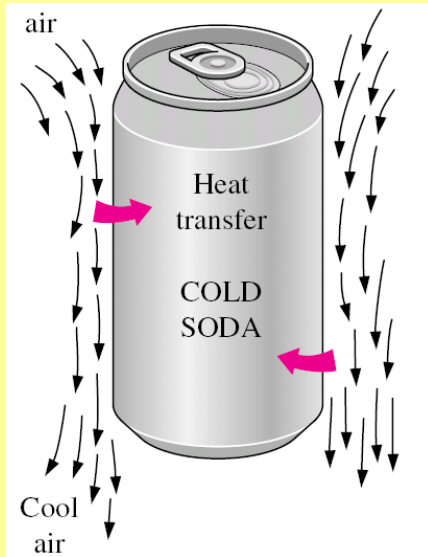


FASE 1



FASE 2

# Convezione

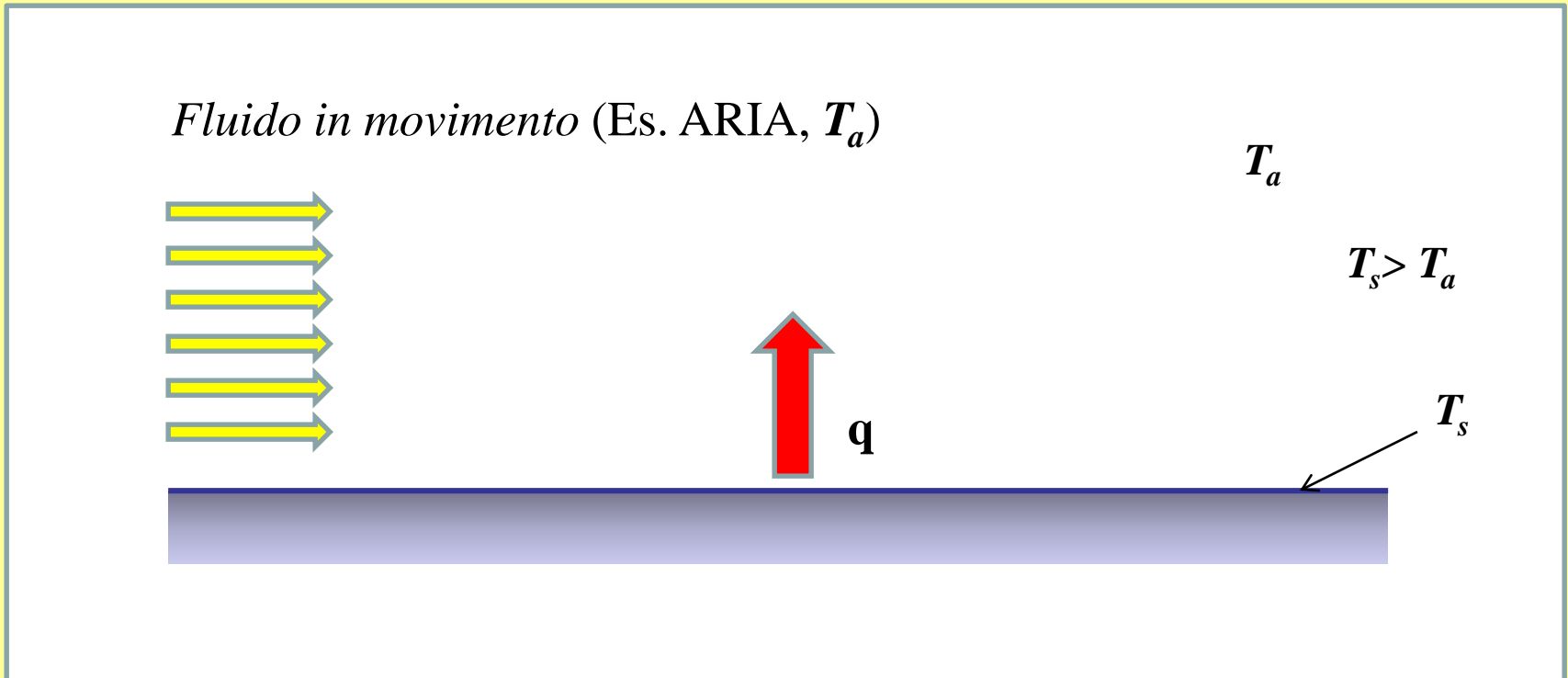


- **Forze ascensionali** che sono responsabili del moto naturale dell'aria per effetto di una differenza di temperatura e pressione
- **Forze di viscosità** che oppongono al moto dell'aria.

# Convezione

## Convezione:

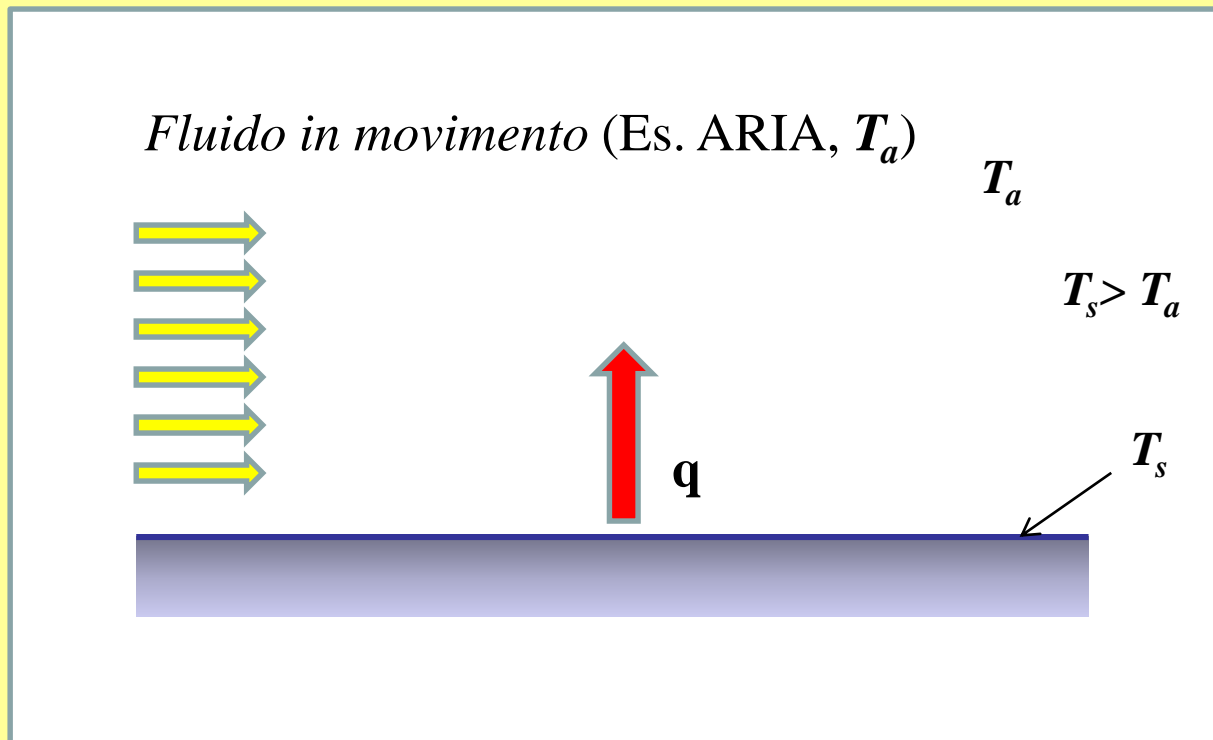
È lo scambio di calore che avviene tra una superficie e un fluido che si trovano a diversa temperatura e in movimento l'uno rispetto all'altra.



# Convezione

Esistono due meccanismi in genere contemporanei:

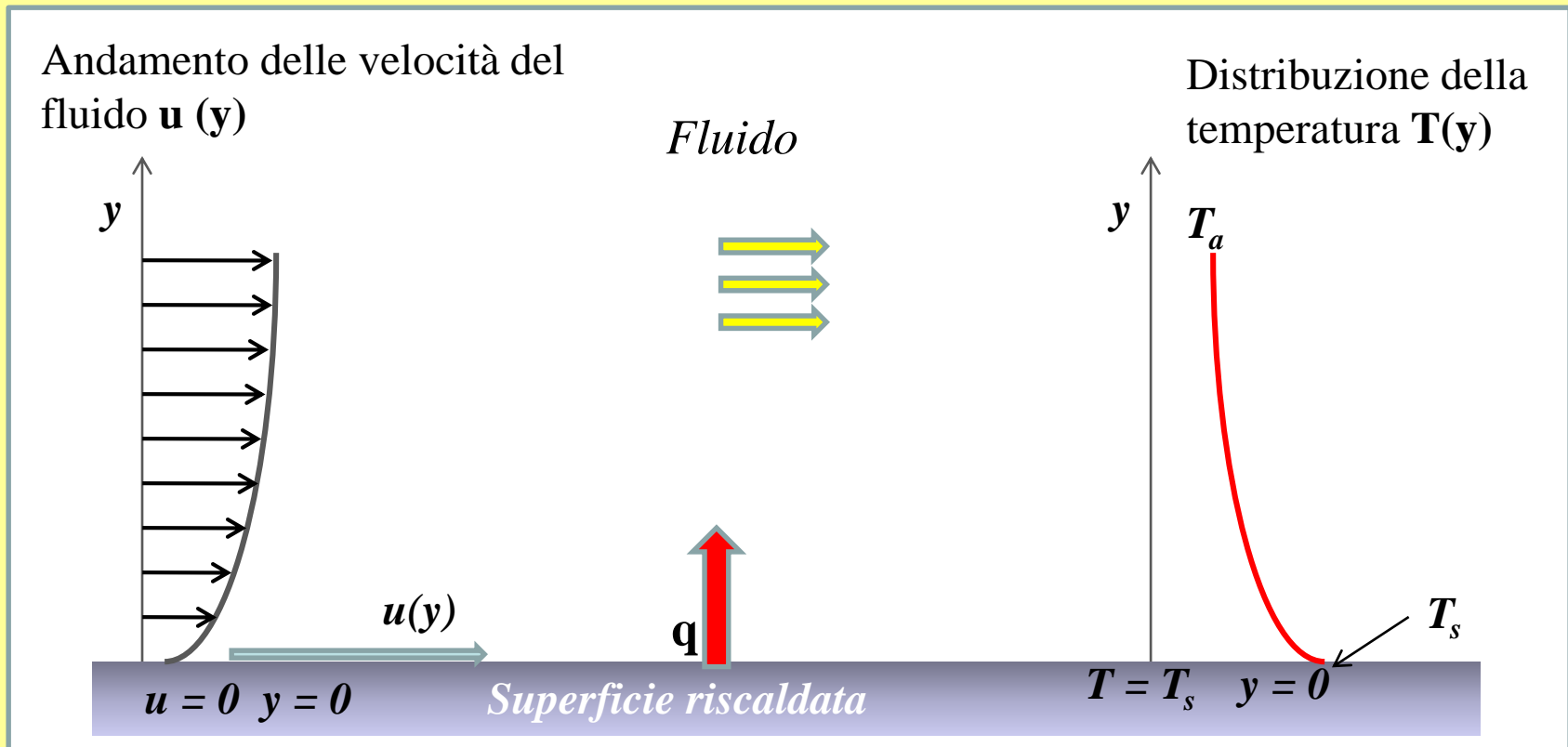
- Urto casuale tra le particelle del fluido in movimento e trasmissione termica per conduzione (velocità  $u = 0$ )
- Scambio di energia termica per trasporto di massa, ossia grazie al movimento del fluido (moto macroscopico). L'insieme delle particelle si muovono collettivamente per effetto di un gradiente di temperatura, contribuendo allo scambio di calore



In prossimità della superficie della parete la velocità dell'aria  $\mathbf{u} = \mathbf{0}$  perché ci sono forze di viscosità che agiscono per l'attrito che la superficie oppone al moto del fluido.

Maggiore è la variazione di velocità più intense sono tali forze

In prossimità della parete dove  $u = 0$  lo scambio di calore avviene per conduzione



### Strato limite dinamico

Regione di fluido adiacente alla parete in cui la velocità varia da 0 al valore della corrente indisturbata

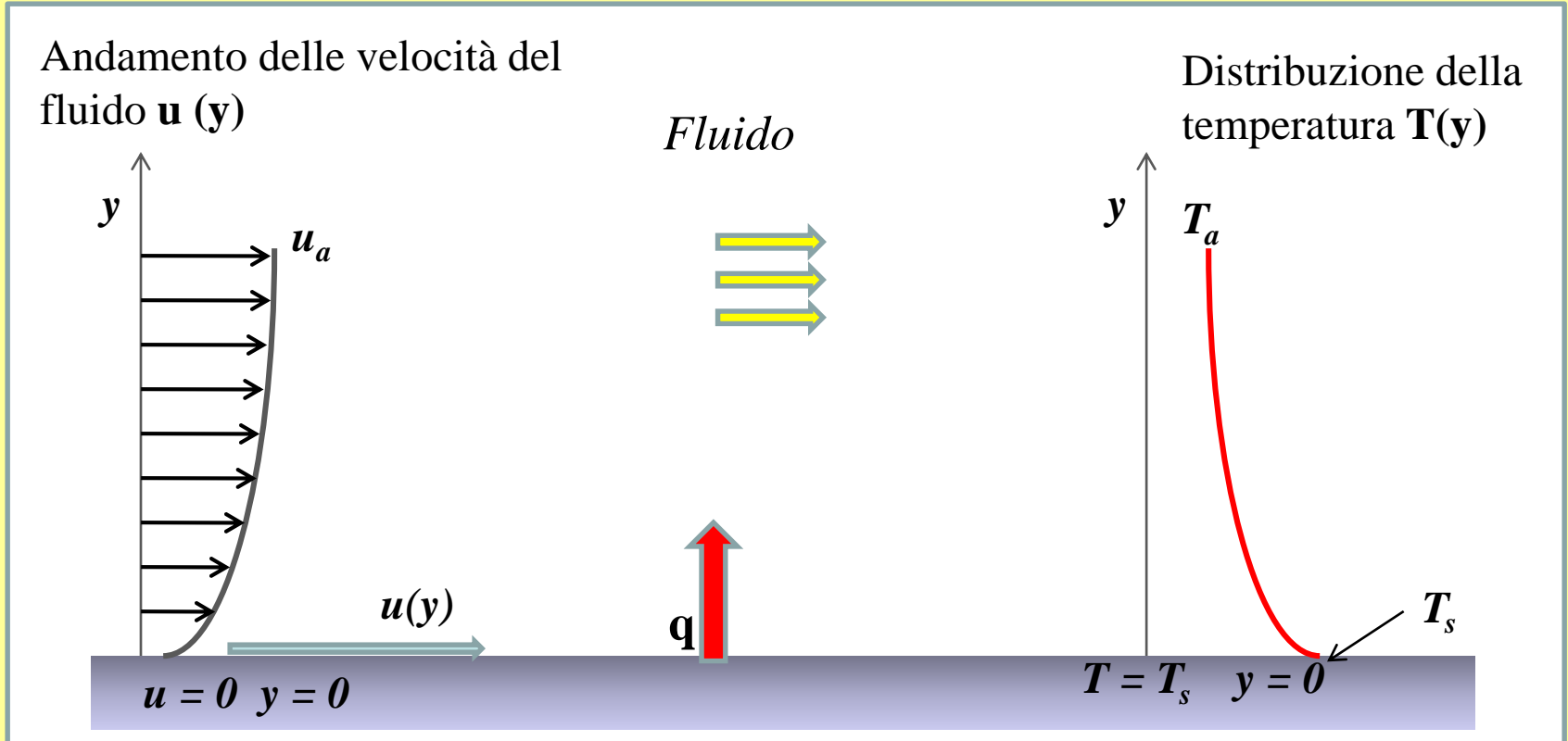
$$\mathbf{u} \quad (0, \mathbf{u}_a)$$

### Strato limite termico

Regione di fluido adiacente alla parete in cui la temperatura del fluido varia da  $T_s$  (temperatura della superficie lambita) a  $T_a$ , temperatura della corrente indisturbata

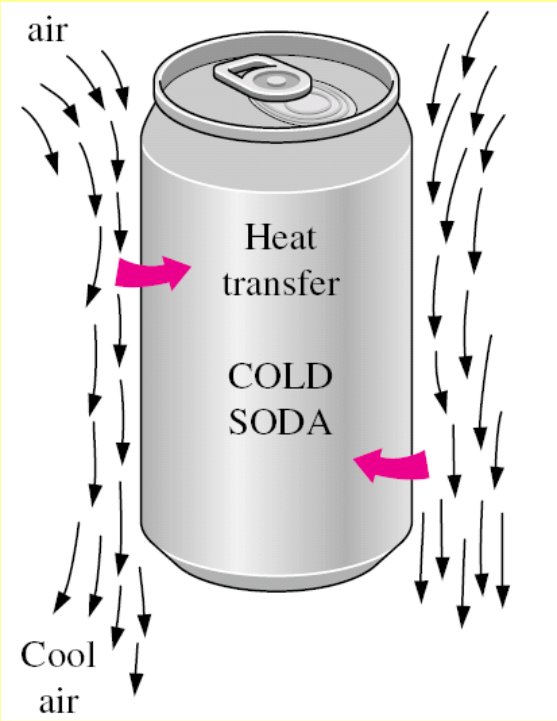
### CORRENTE INDISTURBATA:

Porzione di fluido che circola nell'ambiente ad una distanza dalla superficie della parete solida tale da non risentire dei fenomeni di scambio termico PARETE- FLUIDO



# 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.

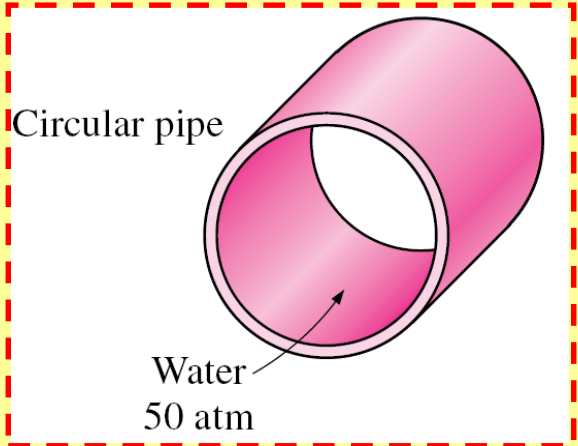


# CONVEZIONE FORZATA

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

**Flusso interno**

**Flusso esterno**



# Legge di Newton

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

$$q = h(T_s - T_a) \quad (\text{W/m}^2)$$

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

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.



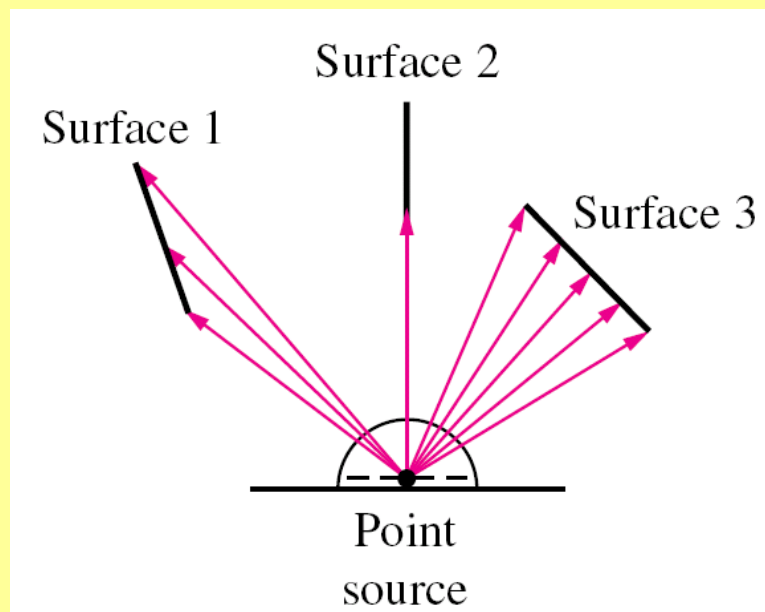
# Alcuni valori di $h$

<b>Processo</b>	<b><math>h</math> (W/m<sup>2</sup>K)</b>
<b>Convezione naturale</b>	
Gas	2-25
Liquidi	50-1000
<b>Convezione forzata</b>	
Gas	25-250
Liquidi	100-20000

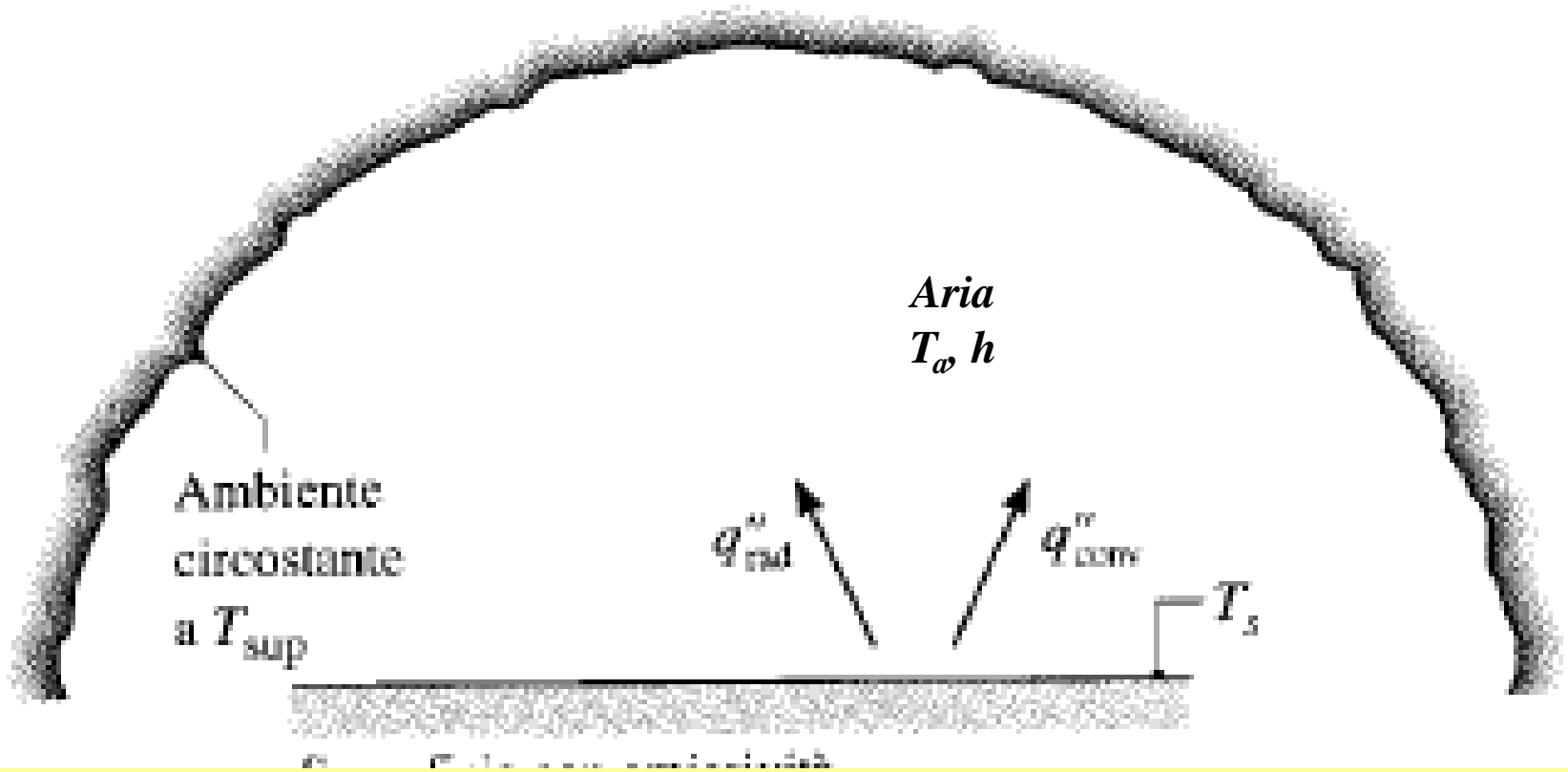
# Irraggiamento termico

Tutte le superfici che possiedono una temperatura emettono energia sotto forma di onde elettromagnetiche.

Pertanto, in assenza di mezzi interposti c'è un trasferimento netto di calore per irraggiamento tra due superfici a diversa temperatura



# Scambi verso l'ambiente



# Irraggiamento termico

A differenza della conduzione e della convezione, l'irraggiamento non ha bisogno di mezzo materiale interposto per propagarsi .

La potenza che una superficie emette per irraggiamento è detto potere emissivo **E**.

Al massimo **E** può essere:

$$E = \sigma T_s^4 \quad (\text{Legge di Stephan-Boltzmann})$$

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

# Irraggiamento termico

Si definisce corpo nero un corpo ideale la cui superficie assorbe ed emette tutta la radiazione che incide sulla sua superficie.

Vale la Legge di Stephan-Boltzmann:

$$E = \sigma T_s^4$$

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

I corpi reali hanno un potere emissivo minore di quello del corpo nero

$$E = \epsilon \sigma T_s^4$$

$\epsilon$  = emissività della superficie

$\epsilon < 1$  corpo reale

$\epsilon = 1$  corpo nero

# Irraggiamento termico

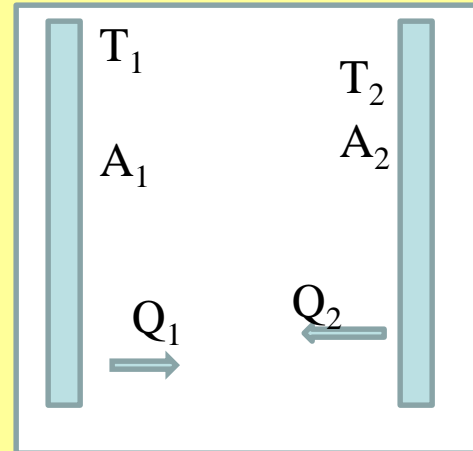
- Consideriamo due superfici reali piane, parallele e completamente affacciate, rispettivamente a temperatura uniforme  $T_1$  and  $T_2$ .
- L'energia netta della radiazione trasmessa tra la superficie 1 e la superficie 2 si esprime:

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = \left( \begin{array}{l} \text{Radiazione emessa} \\ \text{dalla superficie 1} \\ \text{e intercettata dalla} \\ \text{sup.2} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{l} \text{Radiazione} \\ \text{emessa dalla sup.2} \\ \text{e intercettata dalla} \\ \text{sup. 1} \end{array} \right)$$

$$= A_1 Q_{1 \rightarrow 2} - A_2 Q_{2 \rightarrow 1}$$

Se  $A_1 = A_2$  e  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$  ricordando che  $Q = \varepsilon \sigma T_s^4$

$$\dot{Q}_{1 \rightarrow 2} = A_1 Q_{1 \rightarrow 2} - A_2 Q_{2 \rightarrow 1} = \varepsilon A \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$



# Corpo grigio

Si definisce corpo grigio un corpo che emette per data temperatura con emissività proporzionale a quella del corpo nero. Se  $E$  è il potere emissivo di un corpo grigio e  $E_n$  quello del corpo nero, cioè  $\sigma T_s^4$

$$E_n = \sigma T_s^4$$

$$E = \varepsilon E_n = \varepsilon \sigma T_s^4$$

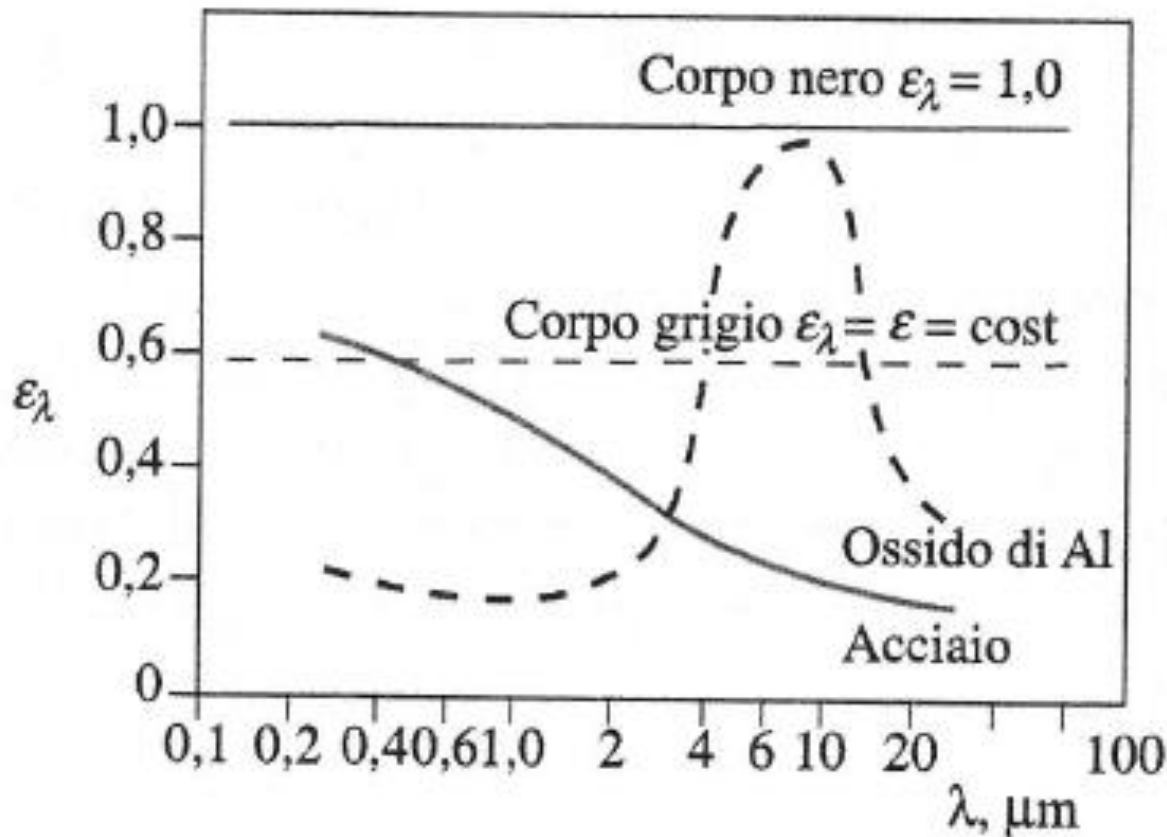
L'emissività di un corpo grigio è

$$\varepsilon = E/E_n$$

Nota l'emissività di un corpo grigio, basta moltiplicarla per l'emissione totale del corpo nero per ottenere l'emissione globale del corpo grigio:

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

$\varepsilon$  per un corpo grigio è sempre minore di uno, ciò significa che esso emette meno di un corpo nero (grafico).

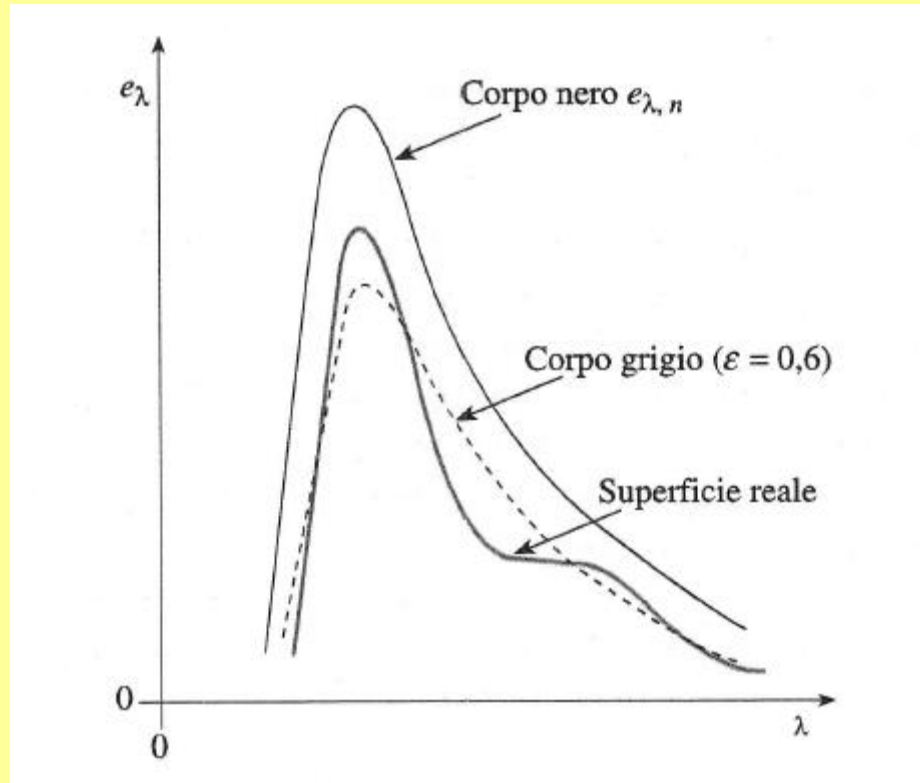


- Un corpo grigio emette sempre in proporzione costante (pari alla sua emissività) rispetto al corpo nero di pari temperatura .
- Quindi per esso  $\epsilon$  non dipende dalla lunghezza d'onda ma solo dalla temperatura,
- Un corpo reale emette sempre meno del corpo nero a pari temperatura



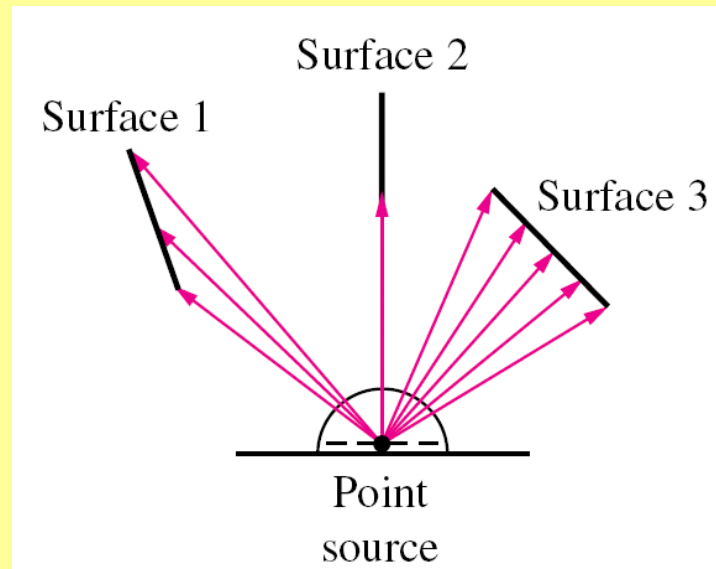
# Corpi reali

- I corpi che non appartengono ai corpi neri e neppure ai corpi grigi sono detti corpi non grigi e sono, in pratica, tutti i corpi reali. Essi emettono sempre meno del corpo nero.



# Il fattore di forma o di vista

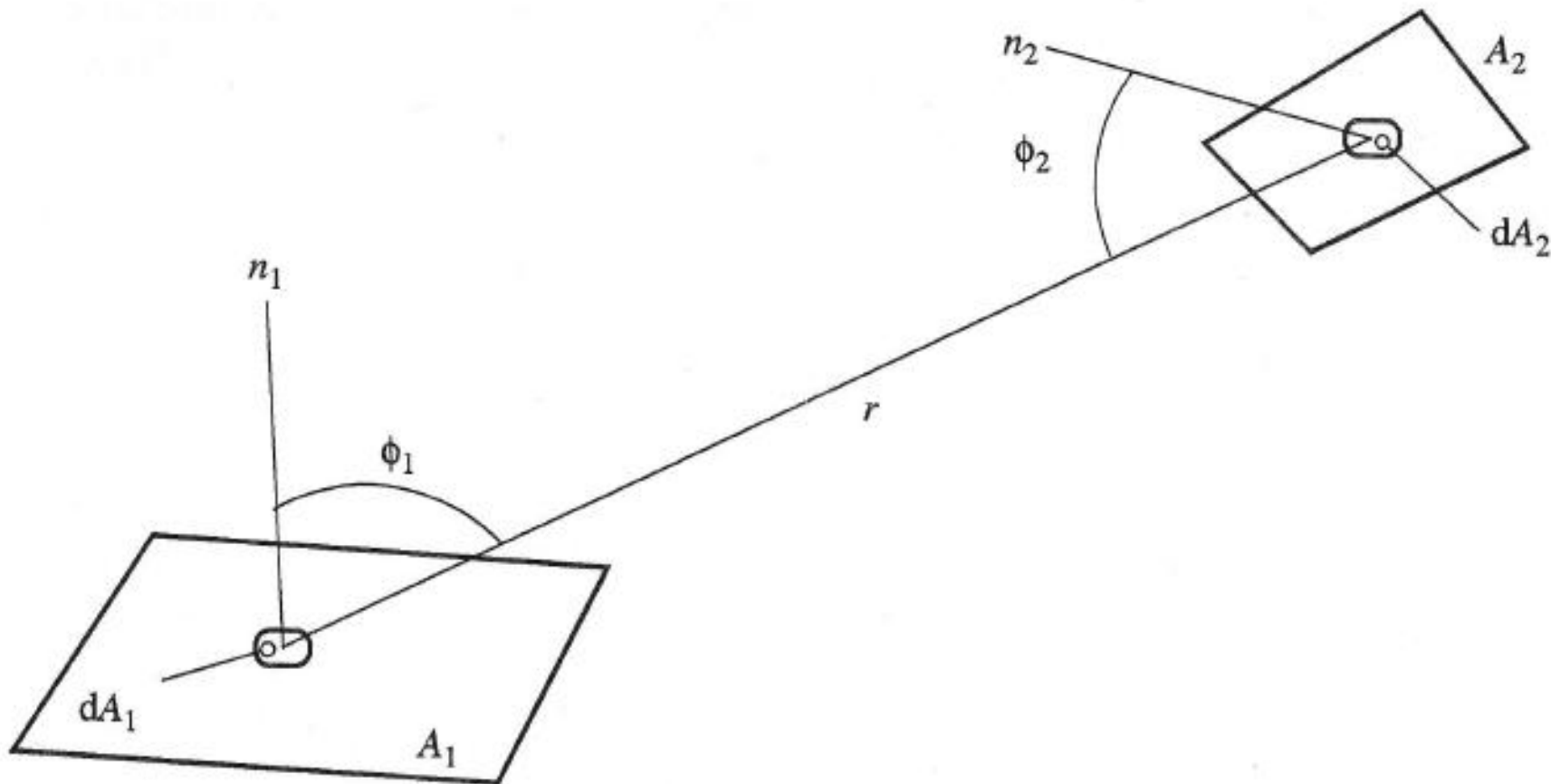
- La radiazione termica scambiata tra due superfici dipende dall'*orientamento relativo* di queste dalle loro proprietà e dalle loro temperature.



- *Il fattore di forma* tiene conto dell'effetto dell'orientamento, è una grandezza geometrica ed è indipendente dalle proprietà delle superfici e dalle temperature.

- Il fattore di forma tra una superficie  $i$  e una superficie  $j$  si indica con  $F_{ij}$ , ed è definito come:
- $F_{ij}$  = *la frazione della radiazione che lascia la superficie  $i$  e incide direttamente sulla superficie  $j$ .*
- Si considerino due superfici elementari  $dA_1$  e  $dA_2$  su due superfici comunque orientate  $A_1$  and  $A_2$ .

Si considerino due superfici elementari  $dA_1$  e  $dA_2$  su due superfici comunque orientate  $A_1$  and  $A_2$ .



# TEOREMA DI RECIPROCIITÀ

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

Per due superfici basta conoscere un solo fattore di forma e le superfici emittenti per conoscere il fattore di forma dell'altra superficie

Pertanto:

il flusso netto scambiato tra due superfici a temperature  $T_1$  e  $T_2$  è:

$$\text{Essendo } Q_{1 \rightarrow 2} = F_{12} A_1 E_{n1} \quad Q_{2 \rightarrow 1} = F_{21} A_2 E_{n2}$$

$$\begin{aligned} Q &= Q_{1 \rightarrow 2} - Q_{2 \rightarrow 1} = F_{12} A_1 E_{n1} - F_{21} A_2 E_{n2} = F_{12} A_1 \sigma T_1^4 - F_{21} A_2 \sigma T_2^4 = \\ &= F_{12} A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) = -F_{21} A_2 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \end{aligned}$$

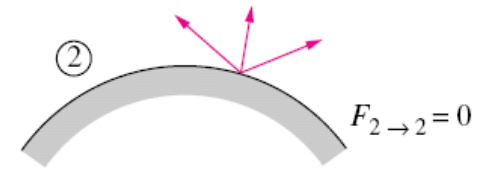
- Quando  $j=i$ :

$F_{ii}$  è la frazione di radiazione che lascia la superficie  $i$  e che colpisce se stessa direttamente.

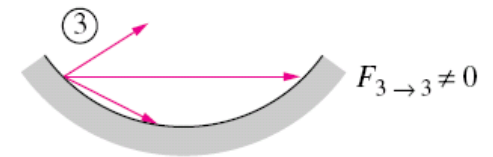
- $F_{ii} = 0$ : per superfici piane o **convesse**
- $F_{ii} \neq 0$ : for superfici **concave**
- Il valore del fattore di forma va da **zero** a **uno**.
  - $F_{ij} = 0$  se le due superfici non si “vedono” tra di loro
  - $F_{ij} = 1$  se la superficie  $j$  circonda completamente la superficie  $i$ .



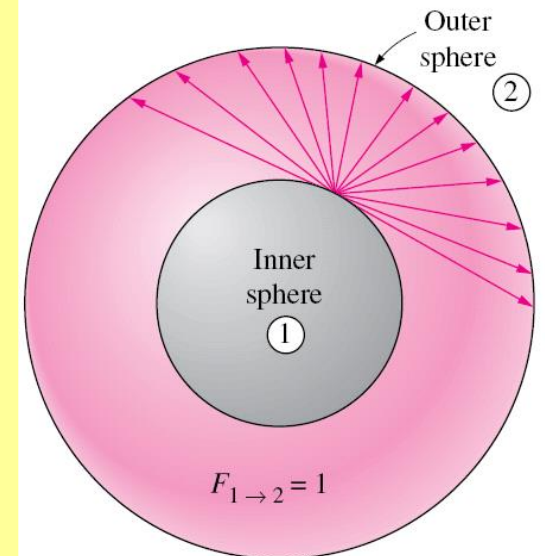
(a) Plane surface



(b) Convex surface



(c) Concave surface



# Relazione di Reciprocità

- Prima abbiamo visto che la coppia di fattori di forma  $F_{12}$  e  $F_{21}$  sono legati dalla relazione:

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

In generale

$$A_i F_{ij} = A_j F_{ji}$$

## Relazione di Reciprocità.

- Si noti che:

$$F_{ij} = F_{ji} \quad \text{quando } A_i = A_j$$

$$F_{ij} \neq F_{ji} \quad \text{quando } A_i \neq A_j$$